République Arabe d'Egypte
Ministère de l'Education et de l'Enseignement
**Secteur Des Livres**

# PHYSIQUE

## Troisième année secondaire

## Groupe de préparation du livre évolué

Prof.D. Mostapha Kamal Mohamed Youssef
Prof. de physique
Faculté de Sciences université de Mansoura

Prof.D. Mohamed Sameh Saïd
Prof. et chef du département d'électronique
et de communications
Université du Caire

D. Mostapha Mohamed El Sayed Mohamed
Prof. de physique
Faculté de Pédagogie
Université de Ain Shams

D. Tarek Mohamed Talaat Salama
Prof. de physique
Faculté de Sciences
Université de Zagazig

Mme Karima Abdel Alim Sayed Ahmed
Inspecteur général de physique
au bureau du conseiller des sciences

## Groupe de révision du livre évolué

Prof.D. Mohamed Amin Soliman
Prof. de physique
Faculté de Sciences-Université du Caire

Prof.D. Sobhi Ragab Atallah
Prof. de physique
Faculté de Sciences-Université du Fayoum

M. Chawki Darwich Moharram
Ex conseiller des sciences

D. Khaled Mohamed Sayed
Chercheur au centre des examens et du
renforcement éducatif

**M: Youssry Fouad Sawiress**
Conseiller des sciences au ministère

## Équipe de modification

**Dr.Mohamed Ahmed Kamel**

**Mr.Sadaka el dardir Mohamed**
**Mr.Alaa el Deen Amer**

Traduit par

A. Baracat – J. Nessim - R.Chémaly – M.Tewfik –
S.Zakhary – Sadaka El dardir
Révisé par
L' I . F . E . P . E

غير مصرح بتداول هذا الكتاب
خارج وزارة التربية والتعليم

**2016 - 2017**

# المقدمة

الفيزياء هى ركيزة العلوم الأساسية : فكلمة فيزياء تعنى فهم طبيعة هذا الكون من حولنا ، وما يجرى فيه كبيراً وصغيراً ، وهى أصل العلوم ويتشابك معها علم الكيمياء الذى يختص بفهم التفاعلات بين المواد وعلم البيولوجى ويختص بما يحدث فى الكائنات الحية ، وعلم الجيولوجيا ويعنى بفهم طبقات الأرض ، وعلم الفلك ويعنى بالأجرام السماوية ، ولكن فى النهاية تبقى الفيزياء أن العلوم وهى أساس التقدم العلمى والتكنولوجى الهائل ، وفهم الفيزياء يعنى فهم القوانين الحاكمة لهذا الكون وهو ما أدى إلى النهضة الصناعية الحضارية التى يقودها الغرب الآن . ولم يكن العرب والمسلمون عامة قادة الحضارة فى العالم إلا بإدراكهم لقيمة فهم قوانين هذا الكون .. وكان لهم فضل اكتشاف معظم قوانين الفيزياء قبل الغرب بقرون ، وما أسس الطب والفيزياء والكيمياء والفلك والرياضيات والموسيقى إلا من وضع علماء العرب والمسلمين .

إن فهم الفيزياء وتطبيقاتها يحول المجتمع من مجتمع ضعيف وفقير ومتخلف إلى مجتمع قوى وغنى ومتقدم ، وهذا ما حدث فى أوروبا وأمريكا واليابان . الكمبيوتر والأقمار الصناعية والتليفون المحمول والتليفزيون كل هذه من ثمار علم الفيزياء ، ثم إنهم يبحثون الآن فى تركيب الجينات وتصنيع كمبيوتر بالشفرة الجينية ، وقريباً يتم تصنيع كمبيوتر باستخدام الذرة والليزر .

إنه عالم رحب لا حدود للخيال فيه ، والذى يجهله إنما يحكم على نفسه بالفناء فى عالم لا يعترف إلا بسطوة العلم وقوة الفكر وروعة الإبداع . إن التقدم العلمى ثمرة لسلسلة طويلة من الاكتشافات . إذ لم يأت هذا التقدم فجأة ، ولكنه رصيد متراكم ، فالعلم مشروع جماعى . كل من ساهم فيه كان لابد له أولاً أن يستوعب ما حققه الآخرون قبله ، وتتابعياً تم بناء هذا الصرح العظيم من تراكم الخبرة الإنسانية عبر التاريخ . ولكن المطلوب من طالب العلم فى هذا العصر أن يلم وبسرعة بما سبق تراكمه من معرفة فى فترة زمنية وجيزة حتى يمكنه أن يضيف جديداً فى فترة حياته وهى أولا وآخراً فترة محدودة . كيف إذاً يمكن حصر كل ما سبقنا فيه الأولون فى فترة دراسية محدودة حتى نفهم ثم نضيف ؟ من حسن حظنا أننا فى دراستنا لما سبقنا فيه الأولون نأخذ خلاصة ما وصلوا غليه ونغض الطرف عن سنوات طويلة من تفاصيل العناء والبحث والتجربة والمشاهدة والمحاولات والإخفاقات . نأخذ فقط ما صح من النتائج وما انتهى إليه الآخرون قبلنا وبما استقر عليه الفهم بعد أن نضج العقل البشرى على مدى القرون . ومن ثم فعلينا أن نركز على المفاهيم الأساسية فى هذا البحر الزاخم ونترك التفاصيل لما بعد ، فلا يمكن أن يلم أحد بكافة تفاصيل العلم ولو قضى حياته كلها فى فرع صغير من فروع أى علم من العلوم ، ولكننا لابد أن نمركز على عدد محدود من المفاهيم الرئيسية والمرجعية ، ونمهد لما بعدها .

ينقسم هذا الكتاب إلى ثلاث وحدات :

تتناول الوحدة الأولى الحرارة ، ويتم دراسة قوانين الغازات فى الفصل السادس . أما الفصل الأول فيتناول فيزياء درجات الحرارة المنخفضة وهى أساس علم التبريد .

أما الوحدة الثانية فتتناول الكهربية التيارية والكهرومغناطيسية . ففى الفصل الثانى نستعرض التيار الكهربى وقانون أوم ، وفى الفصل الثالث نتناول التأثير المغناطيسى للتيار الكهربى وأجهزة القياس الكهربى . أما الفصل الرابع فيتناول الحث الكهرومغناطيسى .

أما الوحدة الثالثة فهى مقدمة فى الفيزياء الحديثة وهى أساس الثورة الهائلة فى علوم العنصر من الكترونيات واتصالات . ففى الفصل الخامس نستعرض ظاهرة ازدواجية الموجة والجسيم ، وفى الفصل السادس نتناول الأطياف الذرية ، وفى الفصل السابع نتناول الليزر وتطبيقاته .

أما الفصل الثامن فيقدم نظرة إجمالية عن الإلكترونيات الحديثة .

ولقد روعى فى هذا الكتاب ما يلى :

١- إزالة الحشو والتفاصيل غير الضرورية فى هذه المرحلة الدراسية والتركيز على المفاهيم العامة وترك الزيادات التى لا تصب مباشرة فى الفهم العام للموضوع .

٢- بدأت الحرارة بفيزياء درجات الحرارة المنخفضة مع تطبيق عن التبريد ( الثلاجة ) مع إضافة موضوع التوصيل الفائق .

٣- ثم تناول الكهربية والمغناطيسية فى ثلاث فصول محددة فى أساسيات الكهربية والمغناطيسية وتطبيقاتها .

٤- تم إبراز المفاهيم الحديثة للفيزياء وخاصة الظواهر الكمية وميكانيكا الكم من خلال فهم ازدواجية الموجة والجسيم وشرح التجارب العملية التى تثبت هذه الظواهر مثل إشعاع الجسم الأسود والتأثير الكهروضوئى وظاهرة كمبتون ، ودراسة تركيب الذرة والأطياف الذرية بأسلوب مبسط والعروج إلى الليزر وتطبيقاته .

٥- ختم الكتاب بفصل جديد عن الإلكترونيات الحديثة عالج فيه باختصار وتبسيط أساسيات الإلكترونيات التناظرية والرقمية وآلية عمل الترانزستور والدوائر المتكاملة التى هى أساس عمل جميع النظم الإلكترونية الحديثة مثل الكمبيوتر . وتطرق إلى الاتجاهات المستقبلية فى عملية التصغير باستخدام تكنولوجيا القرن الجديد النانوتكنولوجيا .

٦- يتميز الكتاب بإضافة أمثلة على التطبيقات اليومية المحسوسة توضيحاً للمفاهيم الفيزيائية من الواقع سواء فى النص أو كمعلومات إثرائية لربط النظرية بالتطبيق على أن تبقى هذه المعلومات الإثرائية غير ملزمة فى الامتحان ويظل دورها هو التشويق العلمى.

٧- يحتوى الكتاب على عدد هائل من الصور المحدثة الواضحة مزيلة بتوصيف لكل صورة . كما تم إخراج الكتاب فى أربعة ألوان طبقاً للمقاييس العالمية فى الكتب المدرسية المتطورة .

٨- يحتوى الكتاب على العديد من الأمثلة المحلولة والأسئلة والتمارين وكلها تقوى الإدراك لدى الطالب بالمعنى الفيزيائى والفهم العميق للمفاهيم الأساسية .

٩- ذيل الكتاب بستة ملحقات عن الرموز والأبعاد والوحدات والثوابت الفيزيائية والبادئات القياسية والحروف الأبجدية اليونانية وأسماء بعض العلماء وإنجازاتهم ومفاتيح البحث على الانترنت وبعض المواقع وبعض المواقع الخاصة بالفيزياء .

١٠- روعى فى الكتاب أن تكون المعادلات باللغة الإنجليزية والمصطلحات باللغتين العربية والإنجليزية وجميع الوحدات المستخدمة طبقاً للنظام الدولى .

١١- تم عمل التجهيزات الفنية وإخراج الكتب فى المركز الاستكشافى للعلوم . المقر الرئيسى بحدائق القبة .

وفى النهاية نوجه رسالة إلى الطالب بأن يأخذ علم الفيزياء بحب لأن فهم الفيزياء هو فهم كل ما حولنا فى الحياة وكل الاختراعات التى نتعامل معها وتلك التى ستخرج إلى النور فى المستقبل القريب . ورسالة للمدرس بأن يكون تدريس الفيزياء بحب وبأسلوب مبنى على نقل المفاهيم لا تلقين الدروس مع ربط كل مفهوم بالمشاهدات اليومية ليكون التعليم مشوقاً ومفيداً .

فقد يكون من بين هؤلاء الطلبة أمامك من سيخرج فى المستقبل القريب بإذن الله ليكون علماً تتحدث عنه الدنيا ويتحدث هو عنك بالفضل والعرفان على أنه فى يوم من الأيام تعلم على يديك وفهم أصول العلم منك ، وإنك أنت الذى مهدت له الطريق ، وكفاك بهذا فخراً

وقد قام المركز الاستكشافي للعلوم بالتجهيزات الفنية والإخراج الفنى لهذا الكتاب طبقاً للمواصفات العالمية للكتب الدراسية المطورة . مع مراعاة ألا يزيد عدد الأسطر فى الصفحات الواحدة عن ٢٤ سطر لإراحة العين ، والإكثار من الصور المعبرة عن المادة العلمية واستخدام كود ألوان لتحديد المفاهيم الهامة والتطبيقات المختلفة والأمثلة المحلولة والاهتمام بتصميم الغلاف كعامل جذب للطالب .


## لجنة إعداد منهج الفيزياء الثانوية العامة المطورة

أ. د . مصطفى كمال محمد يوسف
أ. د . محمد سامح محمد سعيد
د . مصطفى محمد السيد محمد
د . طارق محمد طلعت سلامة
أ . كريمة عبد العليم سيد أحمد

# المحتويات

**Unité 1 : Electricité dynamique**

Chapitre 1 : Le courant électrique et la loi d'Ohm ........................ 10
Chapitre 2 : L'effet magnétique du courant électrique et les appareils de mesures électriques ........................................ 28
Chapitre 3 : Induction électromagnétique .................................. 55
Chapitre 4 : Les circuits du courant alternatif......................... 88

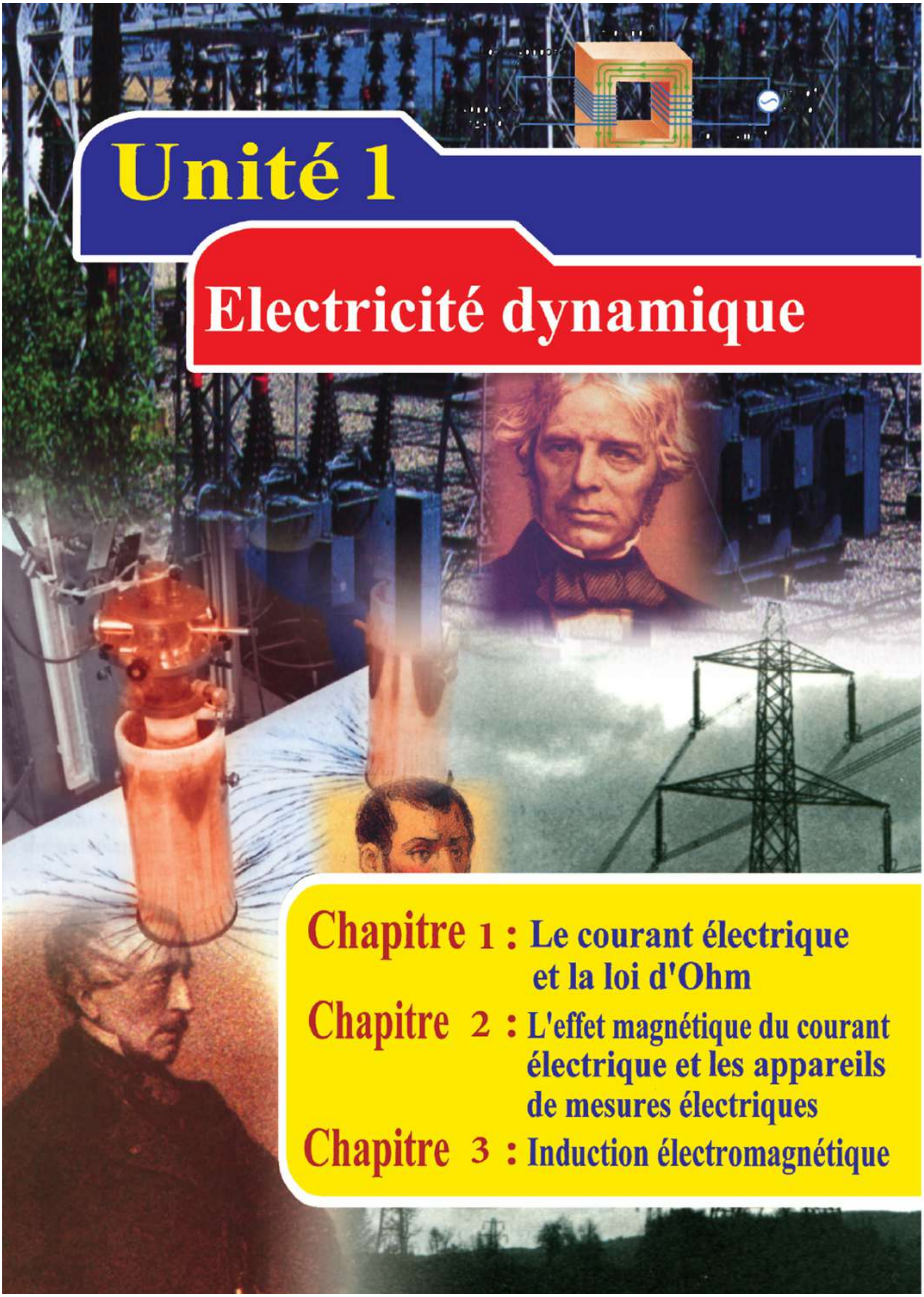
**Unité 2 : Introduction à la Physique Moderne**

Chapitre 5 : La dualité onde corpuscule .................................... 103
Chapitre 6 : Les spectres atomiques ......................................... 130
Chapitre 7 : Le LASER ............................................................ 141
Chapitre 8 : L'électronique moderne ......................................... 162

**Questions et exercices de révision générale selon l'ordre des unités du programme** ............................ 184

**Appendices :**

Appendice 1 : Symboles et unités de quelques grandeurs physiques .... 194
Appendice 2 : Constantes physiques fondamentales ....................... 196
Appendice 3 : Préfixes standard............................................... 197
Appendice 4 : Alphabet grec ..................................................... 198
Appendice 5 : Biographie de quelques physiciens ......................... 199
Appendice 6 : Quelques sites Internet concernant la physique .......... 203



# Unité 1

## Electricité dynamique

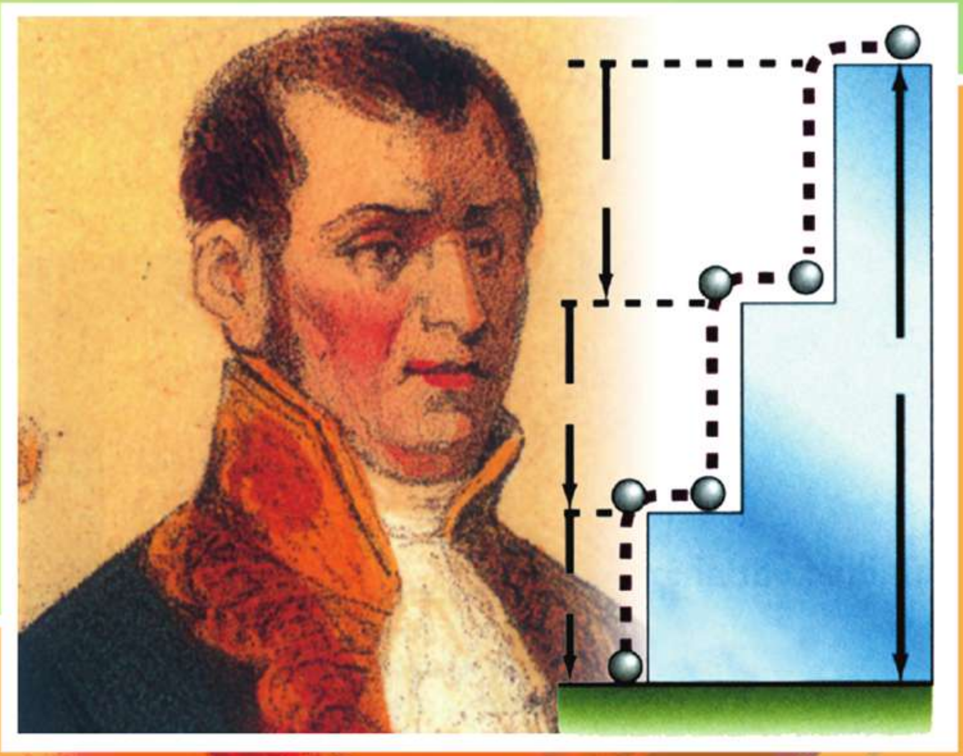
**Chapitre 1 :** Le courant électrique et la loi d'Ohm

**Chapitre 2 :** L'effet magnétique du courant électrique et les appareils de mesures électriques

**Chapitre 3 :** Induction électromagnétique

# Electricité dynamique

# Unité 1



## Chapitre 1 : Le courant électrique et la loi d'Ohm

# Unité 1 : Electricité dynamique

## Chapitre 1

## Le courant électrique et la loi d'Ohm

### Introduction :

1. Le courant électrique est un flux de charges électriques qui circulent dans un conducteur.
2. L'intensité du courant électrique est donnée par la relation

$$I = \frac{Q}{t}$$

où Q est la quantité d'électricité (en coulom b), t est le temps (en seconde) et I est l'intensité du courant (en ampère)

$$\therefore\ 1\ \text{ampère} = \frac{1\ \text{coulomb}}{\text{seconde}} (1A = 1C/s)$$

3- La différence de potentiel entre deux points : $V = \frac{W}{Q}$

Ohm

où W est le travail fourni (en joule) et V est la d.d.p. (en volt)

$$\therefore\ 1\ \text{volt} = \frac{1\ \text{joule}}{\text{coulomb}}$$

4- La force électromotrice (f.é.m.) d'une source est le travail total nécessaire pour transporter une quantité d'électricité de 1 coulomb dans le circuit extérieur et intérieur de la source.

Elle a pour unité le volt comme celle de la d.d.p.

$$\text{f.é.m.} = E = V_B = \frac{W_{total}}{Q}$$

Ampère

5- La résistance (R) est le degré d'opposition d'un conducteur au passage du courant électrique. Elle est mesurée en ohm (Ω).

Elle dépend de :

1. La longueur du conducteur.
2. L'aire de sa section
3. La nature de sa matière à une température constante.

• Elle est calculée par la relation : $R = \frac{\rho_e \ell}{A}$

où : $\ell$ est la longueur du conducteur (en mètre), A est l'aire de sa section (en mètre²) et $\rho_e$ est la résistivité de la matière (en Ω.m)

• La conductivité électrique d'une matière (ou le coefficient de conductibilité électrique) σ est l'inverse de la résistivité

$$\sigma = \frac{1}{\rho_e} \qquad (\text{en } \Omega^{-1}.\text{m}^{-1})$$

6- **Loi d'Ohm :**
L'intensité du courant traversant un conducteur est proportionnelle à la d.d.p. entre ses bornes quand sa température est constante

$$V = I.R$$

7- Avant la decouverte des electrons , il a ȇté convenu que le sens du courant electrique soit du pôle positif vers le pôle negatif à l'exterieur de la source , quand le circuit est fermē . C'est le sens conventionnel du courant électrique.
La decouvrete des electrons a permis d'expliquer que le courant életrique est dû au mouvement des électrons du pôle negatif vers le pôle positif à l'exterieur de la source dans un ciecuit fermé , c – à – d que les électrons deplacent dans le sens contraire du sons conventionnel.

## Association des résistances :

### 1- Montage en série :

Pour obtenir une grand e résistance à partir d'un ensemble de petites résistances, il faut relier celles-ci en série (comme l'indique la figure), ce qui permet d'avoir un trajet continu pour le courant électrique

**Figure (9-1) :** Montage des résistances en série

• Pour trouver la résistance équivalente à cet ensemble de résistances :

1. On insère cet ensemble dans un circuit électrique comprenant une pile, un rhéostat, des ampèremètres et un interrupteur reliés en série comme l'indique la figure (9-2)

2. En fermant le circuit et en ajustant le rhéostat, on peut faire passer un courant d'intensité I (ampère) appropriée.

3. Mesurons les d.d.p. $V_1$, $V_2$, $V_3$ et V (volt) respectivement entre les bornes de $R_1$, $R_2$, $R_3$ et la résistance totale R'

4. On trouve que

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

5. L'intensité du courant étant partout la mê me, on a :

$V_1 = I.R_1$ , $V_2 = I.R_2$ , $V_3 = I.R_3$ et $V = I.R'$

D'où $I.R' = I.R_1 + I.R_2 + I.R_3$

Ou $\boxed{R' = R_1 + R_2 + R_3}$ (9-1)

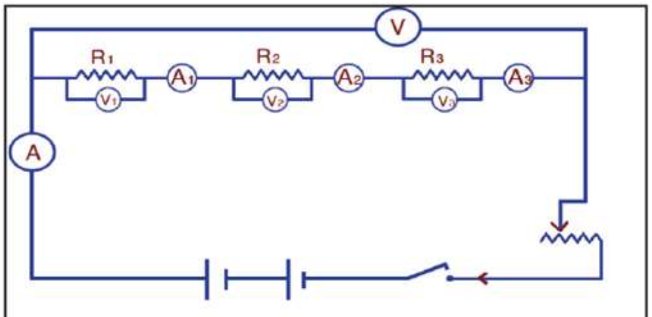



**Figure (9-2)**
Mesure de la résistance équivalente dans le cas du montage en série

• Ainsi, la résistance équivalente R' à un ensemble de résistances reliées en série est égale à leur somme.
R totale est supérieure à la plus grande des résistances composantes.

• Si on a N résistances en série, chacune de valeur r, alors :

$\boxed{R' = N.r}$ (9-2)

## 2- Montage en parallèle :

• Pour obtenir une pe tite résistance à partir d'un ensemble de grandes résistances, il faut relier celles-ci en parallèle comme l'indique la figure (9-3).

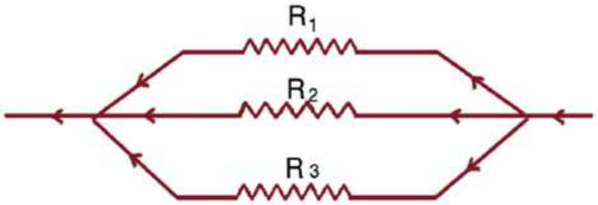



**Figure (9-3)**
Montage des résistances en parallèle

• Pour trouver la résistance équivalente à cet ensemble de résistances :

1. On insère cet ensemble dans un circuit électrique comprenant une pile, des ampèremètres, un rhéostat et un interrupteur reliés en série comme l'indique la figure (9-4).

2. En fermant le circuit et en ajustant le rhéostat ; on peut faire passer un courant d'intensité I (ampère) appropriée dans le circuit principal que l'on peut mesurer au moyen de l'ampèremètre.

3. Mesurons la d.d.p. V (volt) aux bornes des résistances au moyen d'un voltmètre

4. Mesurons les intensités : $I_1$, $I_2$ et $I_3$ traversant respectivement $R_1$, $R_2$ et $R_3$

5. On trouve que $I = I_1 + I_2 + I_3$

6. <u>La d.d.p. V étant partout la même, on a :</u>

$I_1 = \frac{V}{R_1}$ $\quad$ $I_2 = \frac{V}{R_2}$ $\quad$ $I_3 = \frac{V}{R_3}$ $\quad$ et $I = \frac{V}{R'}$

D'où $\frac{V}{R'} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}$ ou $\boxed{\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$ (9-3)

• Ainsi l'inverse de la résistance équivalente est égale à la somme des inverses des résistances composantes.
R totale est inférieure à la plus petite des résistances.

• Le courant aura la plus grande intensité dans la branche de plus faible résistance.

• Si deux résistances sont reliés en parallèle, alors :

$$\boxed{R' = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} \qquad (9\text{-}4)$$

• Si N résistances identiques, chacune de valeur r, sont reliées en parallèle ;

$$\boxed{\frac{1}{R'} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r} + \frac{1}{r} \text{........(N fois)} = \frac{N}{r}} \Rightarrow \boxed{R' = \frac{r}{N}} \qquad (9\text{-}5)$$

• Le montage en parallèle ressemble à ce qui se produit dans l'écoulement de l'eau dans plusieurs tubes reliées en parallèle. Le tube de plus grande section (plus faible résistance) est traversé par l a plus grande quantité d'eau

$$V = IR' = I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3$$

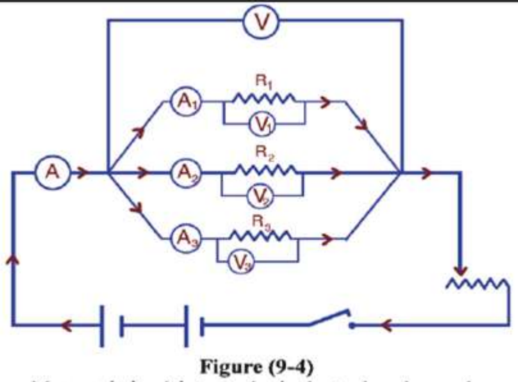



**Figure (9-4)**
Mesure de la résistance équivalente dans le cas du montage en parallèle

## Loi d'Ohm pour un circuit fermé :

• Nous savons que la f.é.m. d'une source est le travail total nécessaire pour transporter une quantité d'électricité de 1C dans le circuit extérieur et intérieur de la source.

• Soit $V_B$=E la f.é.m. d'une pile (ou batterie), I l'intensité du courant dans le circuit, R la résistance externe et r la résistance interne de la pile.

$$V_B = I.R + Ir \Rightarrow \boxed{V_B = I\,(R + r)}$$

$$\text{D'où} \quad I = \frac{V_B}{R+r} = \frac{E}{R+r} \qquad (9\text{-}6)$$

Cette relation est la loi d'Ohm pour un circuit fermé

$$\text{Ainsi} \qquad I = \frac{\text{f.é.m.}}{\text{résistance totale}}$$

## Relation entre la f.é.m. d'une pile et la d.d.p. V entre ses pôles :

• D'après la figure (9-5), on a :

$V_B = IR + Ir = V + Ir$

D'où $V = V_B - Ir$ , $V_B$ et r sont constantes pour chaque pil e

• Si l'on augmente la résistance externe (R), l'intensité (I) du courant diminue

car $I = \frac{V_B}{R+r}$ et la d.d.p. V entre les pôles de la pile augmente.

Plus R augmente plus I diminue et devient négligeable et par suite la d.d.p. V se rapproche de $V_B$

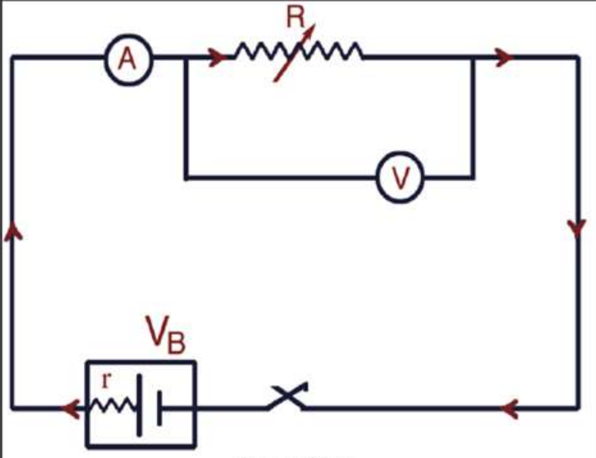



**Figure (5-9)**
Relation entre la f.é.m. d'une pile et la d.d.p. entre ses pôles

• Si R =∞ (circuit ouvert ou de très grande résistance), I = 0 et $V = V_B$

• Donc la f.é.m. d'une pile est égale à la d.d.p. entre ses pôles quand l'intensité du courant dans le circuit extérieur est nulle.

## Exemples :

***1. Trois résistances de 25Ω, 70Ω et 85Ω sont reliées en série avec une batterie de f.é.m. 45 V et de résistance interne négligeable, Calculer :***

***a) L'intensité du courant traversant chaque résistance.***

***b) La d.d.p. entre les bornes de chaque résistance.***

**Solution :**

a) La résistance équivalente du circuit sera :

$R' = R_1 + R_2 + R_3 = 25 + 70 + 85 = 180\ \Omega$

Et d'après la loi d'Ohm pour un circuit fermé

$$I = \frac{V_B}{R+r} = \frac{45}{180+0} = 0{,}25\ A$$

Ainsi l'intensité du courant traversant chaque résistance est 0.25 A car elles sont reliées en série.

b) La d.d.p. entre les bornes de la $1^{ère}$ résistance est

$V_1 = I.R_1 = 0{,}25 \times 25 = 6{,}25\ V$

La d.d.p. entre les bornes de la $2^{ème}$ résistance est

$V_2 = I.R_2 = 0{,}25 \times 70 = 17{,}5\ V$

La d.d.p. entre les bornes de la $3^{ème}$ résistance est

$V_3 = I.R_3 = 0{,}25 \times 85 = 21{,}25\ V$

***2. Si les trois résistances de l'exemple précédent, sont reliées en parallèle avec la même source, calculer :***

***a) l'intensité du courant traversant chaque résistance***

***b) la résistance équivalente***

***c) l'intensité totale du courant***

**Solution :**

a) Puisque les trois résistances sont reliées en parallèle, $V_B = V = 45V$. la d.d.p. entre les bornes de chaque résistance est $V_B = 45V$ (car la résistance interne de la pile = 0)

D'où

$$I_1 = \frac{V}{R_1} = \frac{45}{25} = 1{,}8\ A \quad ; \quad I_2 = \frac{V}{R_2} = \frac{45}{70} = 0{,}643\ A \quad ; \quad I_3 = \frac{V}{R_3} = \frac{45}{85} = 0{,}529\ A$$

b) $$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{25} + \frac{1}{70} + \frac{1}{80}$$

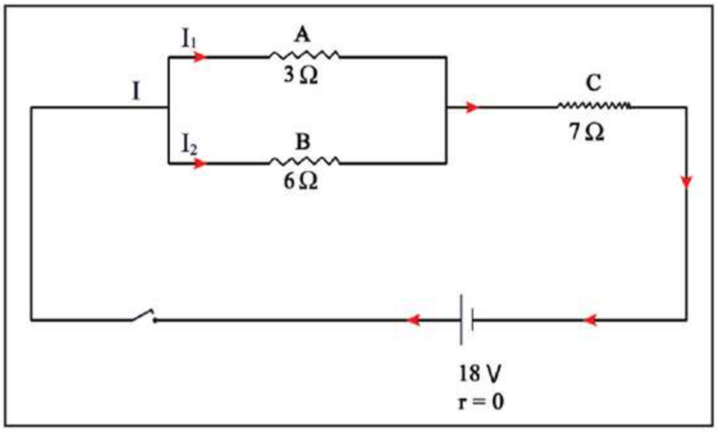
$\therefore R' = 15{,}14\ \Omega$

c) $$I = \frac{V}{R'} = \frac{45}{15{,}14} = 2{,}972\ A$$

de même, on peut calculer I par la formule

$I = I_1 + I_2 + I_3 = 1{,}8 + 0{,}529 + 0{,}528 = 2{,}972\ A$

***3) Dans la figure ci contre, les deux résistances A et B sont reliées en parallèle et l'ensemble est relié en série avec une 3ème résistance C et une pile de f.é.m. 18 V et de résist ance interne négligeable.***




***Sachant que les résistances A, B et C sont respectivement 3Ω, 6Ω et 7Ω, calculer :***

***a) La résistance totale.***

***b) L'intensité du courant traversant le circuit***

***c) L'intensité du courant traversant chacune des résistances A et B***

**Solution :**

a) On calcule la résistance équivalente de A et B

$$R' = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} = \frac{6\times3}{6+3} = 2\Omega$$

Puis on calcule la résistance totale

$R = R' + R_3 = 2 + 7 = 9\Omega$

b) On calcule l'intensité totale du courant dans le circuit

$$I = \frac{V_B}{R} = \frac{18}{9} = 2A$$

c) Pour calculer $I_1$ et $I_2$, on calcule d'abord la d.d.p. entre les bornes des résistances A et B

$V = I.R' = 2 \times 2 = 4\ V$

$$\therefore\ I_1 = \frac{V}{R_1} = \frac{4}{3} = 1{,}333A$$

$$\text{et } I_2 = \frac{V}{R_2} = \frac{4}{6} = 0{,}667A$$

***4) Une pile de f.é.m. 2V et de résistance interne 0.1Ω, est reliée à une résistance de 3.9Ω. Calculer l'intensité du courant dans le circuit.***

**Solution :**

$$I = \frac{V_B}{R+r} = \frac{2}{3{,}9+0{,}1} = 0{,}5A$$

**Lois de Kirchhoff**

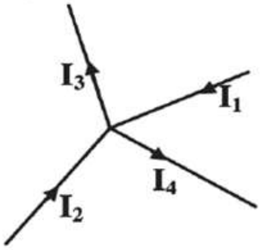
Dans un circuit complexe, il est possible de calculer les différences de potentiel aux bornes de chaque résistance et l'intensité du courant continu dans chaque branche de circuit en appliquant les lois de Kirchhoff.

**1ère loi: Loi de conservation de charge électrique (loi de nœuds)**

Sachant que l'intensité du courant électrique dans un conducteur est un flux des électrons négatifs (charges électriques) qui circulent d'un point à un autre et ne peuvent pas s'accumuler à un endroit quelconque du circuit, Kirchhoff a pu déduire sa 1ère loi qui énonce que:

" *La somme des intensités des courants qui entrent par un nœud dans un circuit électrique fermé est égale à la somme des intensités des courants qui en sortent*."

D'après la figure, on trouve que:



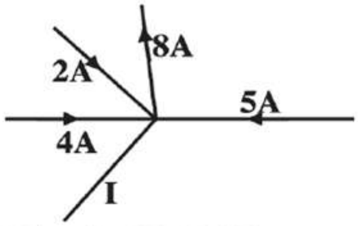

$I_1 + I_2 = I_3 + I_4$

D'où $I_1 + I_2 - I_3 - I_4$

La somme algébrique des intensités des courants en un nœud dans un circuit fermé est égale à zéro, alors $\sum I = 0$

**Exemple:**

D'après la figure ci – contre, calculer la valeur et le sens De l'intensité du courant (I).




Solution

La somme des intensités des courants qui entrent par un nœud = la somme des intensités des courants qui sortent du même nœud

$4 + 5 + 2 = 8 + I$

$I = 3A$

**2ème loi: Loi de conservation d'énergie (loi des mailles)**

Sachant que la force électromotrice est le travail ou l'énergie nécessaire pour déplacer une quantité d'électricité de 1C à travers tout le circuit

et la d.d.p. $V = I.R$

Est le travail ou l'énergie nécessaire pour déplacer une quantité d'électricité de 1C entre deux points dans un circuit, alors la 2ème loi de Kirchhoff énonce que:

"*La somme algébrique des forces électromotrices dans un circuit fermé est égale à la somme algébrique des différences de potentiel dans le circuit*."

Formule mathématique: $\sum V_B = \sum I.R$

Dans un circuit électrique, on distingue:

- Le nœud: point de raccordement entre aux moins deux conducteurs.
- La branche: portion du circuit compris deux nœuds.
- La maille: partie du circuit qui se referme sur elle-même.

**En appliquant les deux lois de Kirchhoff, il faut tenir compte de ce qui suit:**

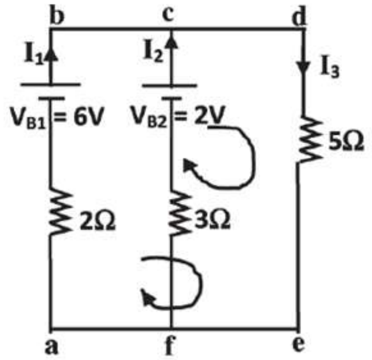
1- On choisit un sens arbitraire pour les courants dans les branches. Si la réponse est positive, alors le sens qu'on a choisi est juste mais si la réponse est négative, alors on doit inverser le sens.

2- On applique la 1ère loi de Kirchhoff en un nœud une seule fois.

3- On choisit un sens arbitraire de parcours sur chaque maille. Le sens contraire est alors négatif.

4- On applique la 2ème loi de Kirchhoff en plusieurs mailles.

5- Le sens de la f.é.m. allant du pôle négatif au pôle positif est positif s'il est dans le même choisi et il est négatif s'il est en sens contraire.




**Exemple.**

1) Dans le circuit indiqué, calculer:-

1- L'intensité du courant dans chaque branche.

2- La d.d.p. entre les deux points a et b.

Solution

On choisit le sens des courants comme indiqué dans la figure et on applique la 1ère loi de Kirchhoff au nœud (c)

$I_1 + I_2 = I_3$ (1)

On applique la 2ème loi dans la maille (abdea)

$\sum V_B = \sum I.R$

$6 = 2I_1 + 5I_3 = 2I_1 + 5(I_1 + I_2)$

$6 = 7I_1 + 5I_2$ (2)

On applique la 2ème loi dans la maille (cdefc)

$2 = 3I_2 + 5I_3 = 3I_2 + 5(I_1 + I_2)$

$2 = 5I_1 + 8I_2$ (3)

De (2) et (3), on multiplie (2) par 5 et (3) par 7

$30 = 35I_1 + 25I_2$

$14 = 35I_1 + 56I_2$

D'où $I_2 = -0{,}516A$ le signe négatif indique que le sens de $I_2$ est opposé à celui qu'on a choisi

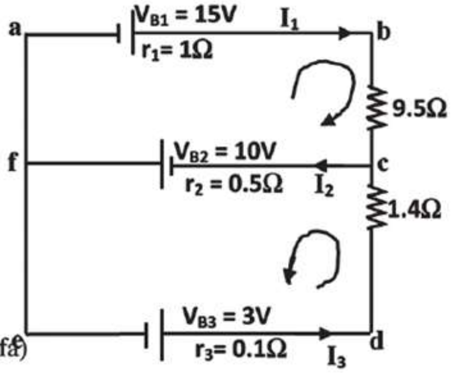
$I_1 = 1{,}226A$ le signe positif indique que le sens qu'on a choisi est correct.

De (1) $I_3 = 0{,}71A$

2- Pour calculer la d.d.p. entre les deux points a et b

$V = V_B - IR$

$= 6 - 1,226 \times 2 = 3,55V$




**Exemple 2:**

Dans le circuit ci – contre, calculer $I_1, I_2$ et $I_3$

Solution:

On applique la 1[ère] loi de Kirchhoff au nœud (2)

$I_1 + I_3 = I_2$ (1)

On applique la 2[ème] loi de Kirchhoff dans la maille (abcfa)

$\sum V_B = \sum I.R$

$15 + 10 = (1 + 9,5)I_1 + 0,5\, I_2$

$50 = 21I_1 + I_2$ (2)

On applique la 2[ème] loi de Kirchhoff dans la maille (fcdef)

$3 + 10 = 0,5I_2 + (0,1 + 1,4)I_3$ [on multiplie par 2]

$26 = I_2 + 3I_3 \longrightarrow 26 - 3I_3 = I_2$ (3)

De (1) et (2)

$50 = 21(I_2 - I_3) + I_2 = 22I_2 - 21I_3$ (4)

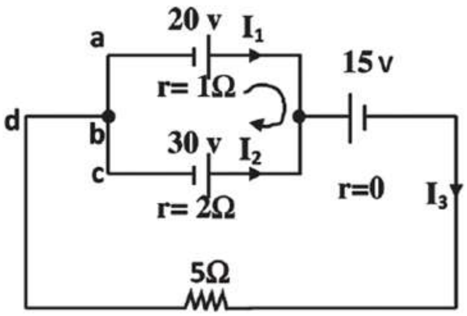
De (3) et (4)

$50 = 22(26 - 3I_3) - 21I_3 \longrightarrow I_3 = 6A$

De (3), $I_2 = 8A$

De (1), $I_1 = 2A$

Les valeurs positives des courants indiquent que les sens qu'on a choisis sont corrects




**Exemple 3:**

Dans le circuit ci – contre, calculer:

1- L'intensité du courant qui traverse chaque batterie.

2- La d.d.p. aux bornes de chaque batterie.

3- La d.d.p. aux bornes de la résistance 5Ω.

Solution

On applique la 1[ère] loi de Kirchhoff au nœud (e)

$I_1 + I_2 = I_3$ (1)

On applique la 2[ème] loi de Kirchhoff dans la maille (aecba)

$20 - 30 = I_1 \times 1 - I_2 \times 2$

$-10 = I_1 - 2I_2$ (2)

On applique la $2^{ème}$ loi de Kirchhoff dans la maille (aefdba)

$20 - 15 = I_1 \times 1 + I_3 \times 5$

$5 = I_1 + 5(I_1 + I_2)$

$5 = 6I_1 + 5I_2$ (3)

De (2) et (3), On multiplie (2) par 5 et (3) par 2 puis on les additionne

$-50 = 5I_1 - 10I_2$

$10 = 12I_1 + 10I_2$

D'où $I_1 = -2{,}35A$

Le signe négatif indique que le sens de $I_1$ est apposé à celui qu'on a choisi, alors la batterie 20V est en recharge

De (2), $I_2 = 3{,}82A$ alors la batterie 30V est en décharge

$I_3 = 1{,}46A$

La d.d.p. aux bornes de la batterie 20V: $V_1 = 20 + 2{,}35 \times 1 = 22{,}35V$

La d.d.p. aux bornes de la batterie 30V: $V_2 = 30 - 2{,}82 \times 2 = 22{,}3V$

La d.d.p. aux bornes de la résistance 5Ω: $V_3 = 5 \times 1{,}46 = 7{,}3V$

# Résumé :

***Les formules importantes :***

- Si une quantité d'électricité Q traverse une section d'un circuit pendant un temps t, l'intensité du courant $I = \frac{Q}{t}$
- Si le travail fourni pour déplacer une quantité d'électricité Q (coulomb), est W (joule), la d.d.p. (en volt) est $V = \frac{W}{Q}$
- <u>Loi d'ohm :</u> Si V (volt) est la d.d.p. entre les bornes d'un conducteur et I (ampère) est l'intensité du courant qui le traverse,

$R = \frac{V}{I}$ où R est la résistance du conducteur

- <u>La résistivité</u> : ($\Omega$.m)

$\rho_e = \frac{R.A}{\ell}$ à une température constante

où R est la résistance du conducteur d'aire de section A ($m^2$) et de longueur $\ell$(m)

- La conductivité électrique : $\sigma = \frac{1}{\rho}$ $\Omega^{-1}.m^{-1}$
- Montage des résistances en série : $R' = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots\ldots$

Pour des résistances égales, chacune de valeur r; R' = N.r où N est le nombre de résistances

- Montage des résistances en parallèle $\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots\ldots$

Pour des résistances égales, chacune de valeur r; $R' = \frac{r}{N}$ où N est le nombre de résistances.

- Loi d'Ohm pour un circuit fermé : $I = \frac{V_B}{R + r}$ et V = E - Ir ou $V = V_B - Ir$

où I est l'intensité du courant traversant le circuit, $E = V_B$ est la f.é.m. de la pile, R est la résistance totale du circuit extérieur et r est la résistance interne de la pile.

La première loi de kiechhoff.

"La somme des intensites des courants qui entrent par noeud dans un circuit electrique ferme est egale à la somme des intensites des courants qui en sortent"

La deuxieme loi de kirchhoff.

"La somme algébrique des forces électromotrices dans un circuit férme est égale à la somme algébrique des différences de potentiel dans le circuit. "

Formule mathematique: $\sum V_B = \sum I.R$

# Questions et exercices :

## 1) Compléter :

1. Si l'intensité du courant électrique dans un circuit est 3A; la quantité d'électricité traversant une section pendant une minute est égale à ……..

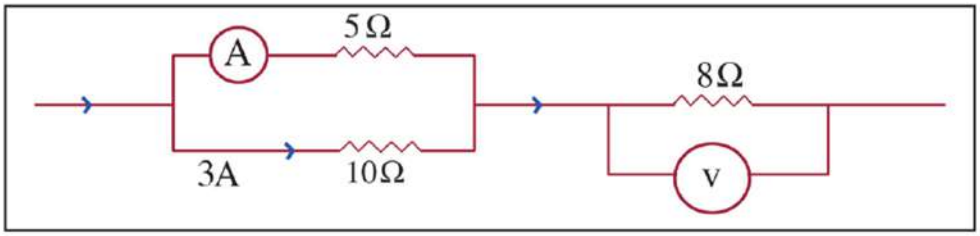
2. La d.d.p. en volt qui permet le passage d'un courant d'intensité 3A, à travers une résistance de 6Ω est égale à ……..

3. Si la d.d.p. entre les bornes d'une résistance de 2Ω est 6V; l'intensité du courant qui la traverse est égale à ……..

4. Si deux résistances égales, chacune de 1Ω sont reliées en série, la résistance équivalente est égale à …….., mais si elles sont reliées en parallèle, la résistance équivalente est égale à ……..

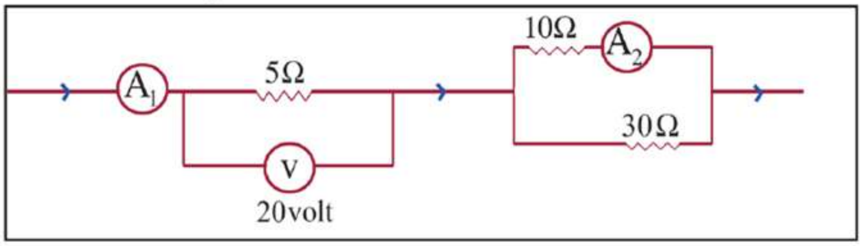
5. La f.é.m. a la m ême unité de mesure que celle de ……..

6. Dans le circuit indiqué :




La lecture de l'ampèremètre A est égale à ……..
La lecture du voltmètre V est égale à ……..

7. Dans le circuit indiqué :




a) La lecture de $A_1$ est égale à ……..
b) La lecture de $A_2$ est égale à ……..

## 2) Choisir la réponse correcte :

• Quatre lampes, chacune de résistance 6Ω, sont reliées en parallèle et l'ensemble est relié à une pile de f.é.m. 12V et de résistance interne négligeable.

8. L'intensité du courant traversant la pile est égale à ……..

a) 8A  b) 6A  c) 4A
d) 2A  e) 0A

9. La charge totale débitée par la batterie pendant 10 secondes est ........

a) 80C b) 60C c) 40C
d) 20C e) zéro

10. L'intensité du courant traversant chaque lampe est égale à ........

a) 2A b) 8A c) $\frac{3}{2}$A
d) 1A e) 2A

11. La d.d.p. entre les bornes de chaque lampe est égale à ........

a) 3V b) 12V c) 6V
d) 2V e) 4V

12. La résistance totale des lampes est égale à ........

a) $\frac{2}{3}\Omega$ b) $24\Omega$ c) $\frac{3}{2}\Omega$
d) $6\Omega$ e) $12\Omega$

13. Si les quatre lampes sont reliées en série, la résistance totale sera :

a) $\frac{2}{3}\Omega$ b) $24\Omega$ c) $\frac{3}{2}\Omega$
d) $6\Omega$ e) $12\Omega$

## 3) Questions de cours :

1. Expliquer comment démontrer que la résistance équivalente à trois résistances reliées en série est donnée par la relation $R' = R_1 + R_2 + R_3$

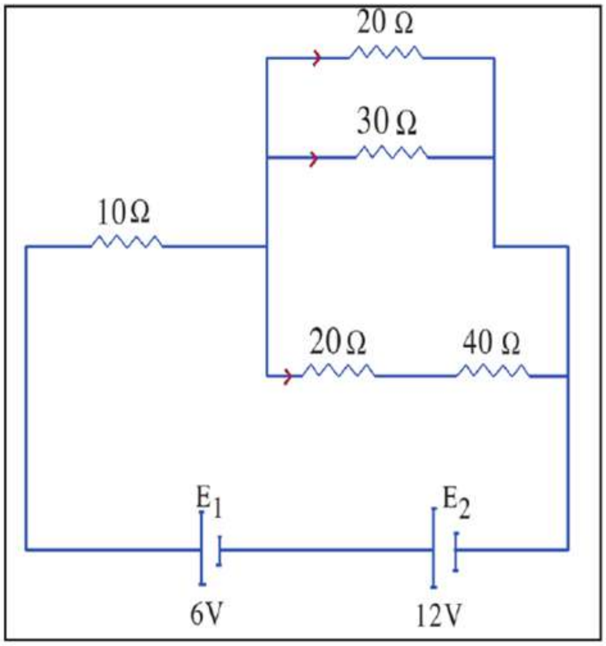
2. Expliquer comment démontrer que l'inverse de la résistance équivalente à trois résistances reliées en parallèle est égale à la somme des inverses.

3. Quels sont les facteurs dont dépend la résistance d'un conducteur ?

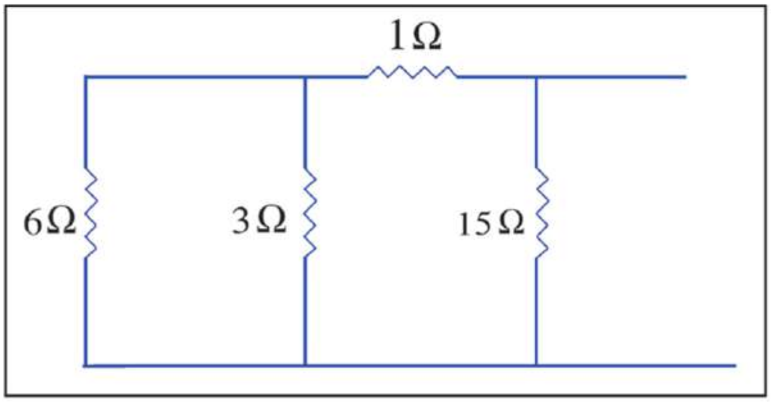
## 4) Exercices;

1- Calculer la résistance totale du ci rcuit indiqué sur la figure ci-contre. Trouver ensuite l'intensité du courant total sachant que la résistance interne de chaque pile est de 2Ω

(Réponse : 20Ω, 0,75A)




2- Calculer la résista nce équivalente à celles indiquées sur la figure ci-dessous




(Réponse : 2,5 Ω)

3- Dans le circuit indiqué sur la figure (9-5), la f.é.m. de la pile est 15V et sa résistance interne est 0,3Ω. Si la résistance du circuit extérieur est 2,7Ω, calculer :

a) La lecture du voltmètre si l'interrupteur est ouvert, en supposant que la résistance du voltmètre est infinie (Réponse : 15V)

b) La lecture du voltmètre si K est fermé (Réponse : 13,5V)

4- Un élève a fabriqué une résistance en utilisant un fil d'une matière déterminée, puis il a fabriqué une autre résistance en utilisant un autre fil de même matière mais dont le diamètre est égal au rayon du 1$^{er}$ fil et la longueur est égale au double de celle du 1$^{er}$. Trouver le rapport de leurs résistances.

(Réponse : $\frac{8}{1}$ )

5- Si la d.d.p. entre les bornes d'un fil en cuivre de 70 cm de longueur et de $2 \times 10^{-6}$ cm$^2$ d'aire de section est 3V; calculer l'intensité du courant qui le traverse sachant que la résistivité du cuivre = $1{,}7\times 10^{-8}\,\Omega$.m (Réponse : 11,17 A)

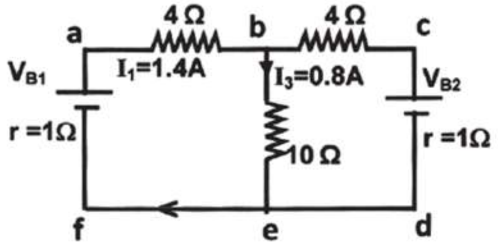
6- Une résistance de 5,7Ω est reliée à une pile de f.é.m. 12V et de résistance interne 0,3Ω, calculer ;

a) l'intensité du courant traversant le circuit.

b) la d.d.p. entre les bornes de la résistance (Réponse : 2,4A ; 11,28V)

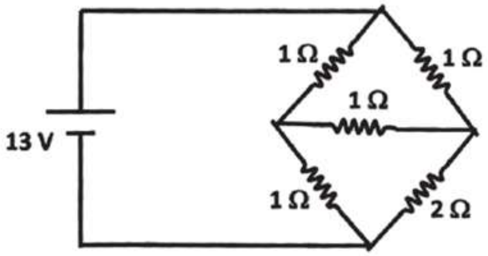
7- En utilisant le circuit ci-contre, calculer:

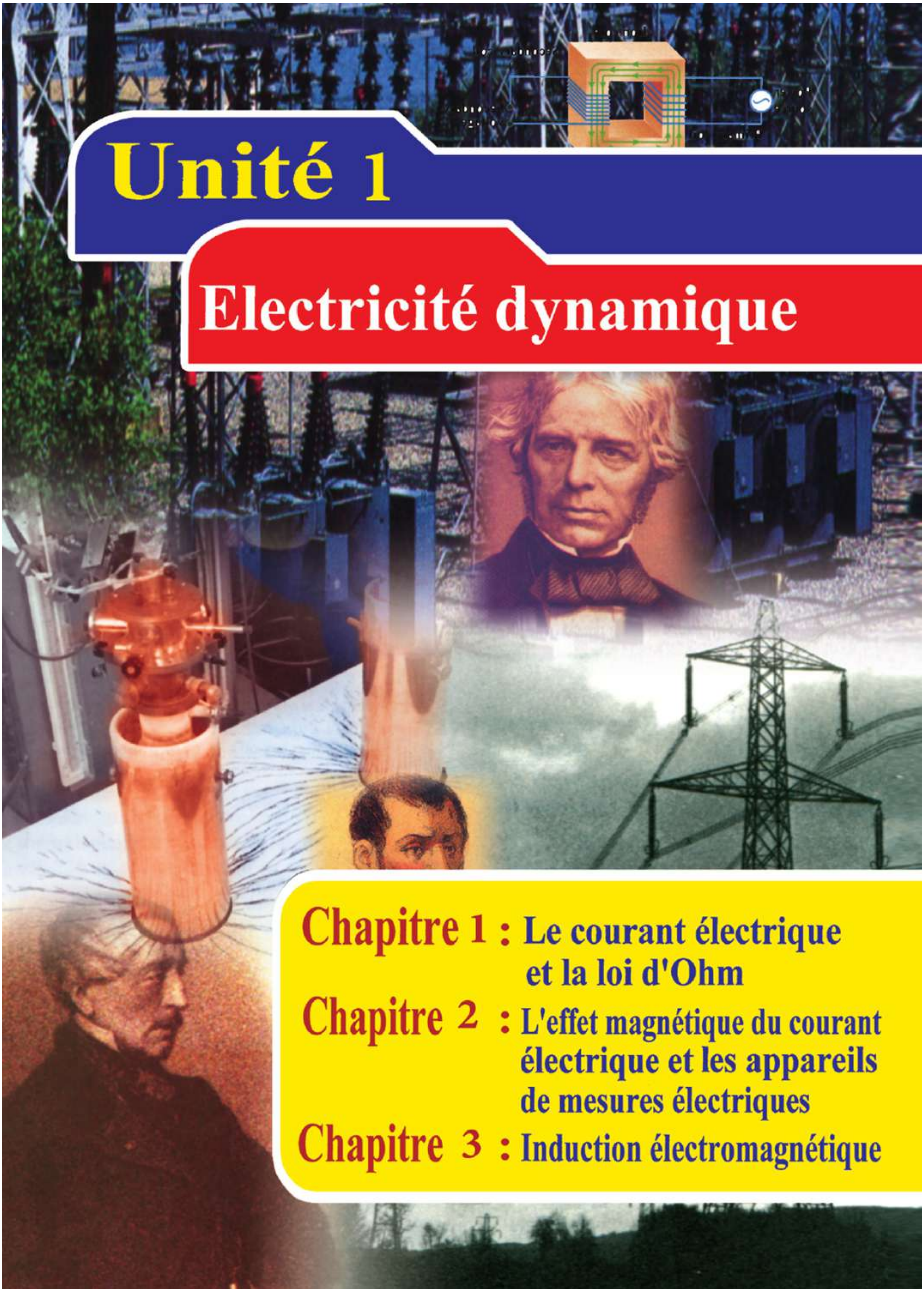
a) $V_{B1}$ et $V_{B2}$




b) La diffesence de potentielle entre (e ,b)

8- En utillisant le circuit ci-contre, calculer la resistance equivalente





# Unité 1

# Electricité dynamique


**Chapitre 1 :** Le courant électrique et la loi d'Ohm

**Chapitre 2 :** L'effet magnétique du courant électrique et les appareils de mesures électriques

**Chapitre 3 :** Induction électromagnétique

# Chapitre 2

# L'effet magnétique du courant électrique et les appareils de mesures électriques

## Introduction :

- En 1819, le savant Danois "Hans Oersted" a place une petite boussole près d'un fil parcouru par un courant électrique. Il constata que l'aiguille de la boussole dévie. et que lorsque le courant dans le fil s'annule, l'aiguille retourne à sa position initiale. De là il d'édiut que le courant engendre un champ magnétique autour du fil qui influence la boussole.
- Cette découverte a conduit à une série d'études qui a permis de modifier notre civilisation industrielle.
- Nous allons étudier dans ce chapitre le champ magnétique engendré par le passage du courant dans :
  - a) Un fil rectiligne
  - b) Une bobine circulaire
  - c) Un solénoïde (une bobine en spirale)

## Champ magnétique d'un courant électrique traversant un fil

- Pour étudier la forme des lignes du flux magnétique autour d'un fil rectiligne traversé par un courant :

1. Prenons une plaque en carton horizontale traversée par un fil vertical, traversé par un courant.
2. Saupoudrons le carton avec de la limaille de fer et tapons légèrement sur la plaque pour libérer les grains de fer de la friction.
3. Nous remarquons que :

- La limaille de fer prend la forme de cercles concentriques do nt le centre est le point où le fil traverse le carton (figure 10-1)

Oersted

**Figure (10-1)**
Distribution de la limaille de fer autour d'un fil traversé par un courant électrique

- La figure montre que les lignes du flux magnétique sont serrées près du fil et qu'elles s'écartent en s'éloignant de ce fil.
  Par suite l'intensité du champ magnétique augmente plus on s'approche du fil.
- Si on augmente l'intensité du courant traversant le fil puis on tape à nouveau sur le carton, on remarque que les lignes de flux magnétiques, autour du fil, deviennent de plus en plus serrées
  Par suite, l'intensité du champ augmente en augmentant l'intensité du courant traversant ce fil.
- L'intensité du champ magnétique en un point est mesurée par une grandeur appelée "densité B du flux magnétique". B se mesure en tesla (T) ou en weber/mètre$^2$ (Wb/m$^2$) ou en newton/ampère.mètre (N/A.m).
- Le flux magnétique $\phi_m$ traversant perpendiculairement une surface d'aire A exposée à ce champ magnétique de densité B est $\phi_m = B \times A$ ou $B = \frac{\phi_m}{A}$ où $\phi_m$ est en Wb et A en m$^2$. Donc la densité du flux magnétique en un point est le flux traversant une unité de surface entourant ce point.

**Formule :**

- La densité du flux magnétique en un point distant d d'un fil traversé par un courant est :

$$\boxed{B = \frac{\mu I}{2\pi d}} \text{ (weber/m}^2 \text{ ou tesla ou N/A.m)} \qquad (10\text{-}1)$$

  où I (ampère) est l'intensité du courant traversant le fil ; d (mètre) est la distance entre le point et le fil et $\mu$ est le coefficient de perméabilité magnétique du milieu entourant le fil ($\mu_{air} = 4\pi \times 10^{-7}$ Wb/A.m)
- Cette relation est appelée loi d'Ampère pour un circuit. Elle montre que $B \propto I$ et $B \propto \frac{1}{d}$,
- Pour diminuer la densité B du flux magnétique engendrée par les câbles de haute tension et par suite diminuer l'effet de ce champ sur la santé des êtres vivants, il est nécessaire de construire les maisons loin de ces câbles.

## Règle de la main droite d'Ampère :

- Elle est utilisée pour déterminer le sens du champ magnétique engendré par le passage du courant dans un fil
- La main droite saisit le fil de telle sorte que le pouce indique le sens du courant; les extrémités des autres doigts enroulés autour du fil indiquent alors le sens du champ magnétique (figure 10-2).

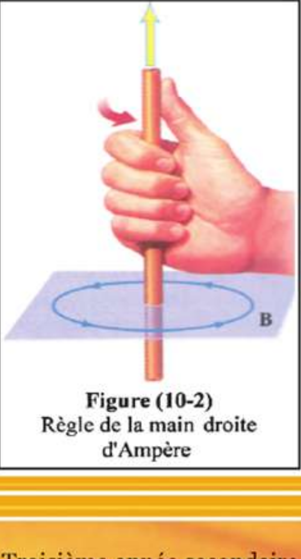



**Figure (10-2)**
Règle de la main droite d'Ampère

**Exemple :**

***Calculer la densité du flux magnétique en un point situé dans l'air à 10 cm d'un fil, traversé par un courant d'intensité 10A, sachant que*** $\mu_{air} = 4\pi \times 10^{-7}$ ***Wb/A.m***

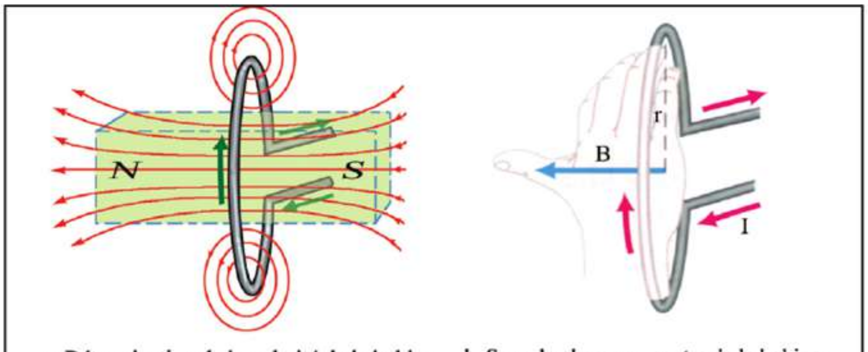
**Solution :**

$$B = \frac{\mu.I}{2\pi d} = \frac{4\pi\times10^{-7}\times10}{2\pi\times0.1} = 2\times10^{-5}\ \text{tesla}$$

## Champ magnétique d'un courant traversant une bobine circulaire :

a. Formation des lignes du flux

- Si un courant électrique traverse un fil enroulé en forme d'un anneau circulaire, le champ magnétique résultant ressemble au champ obtenu par celui d'un aimant court, de manière que la face sud est la face de l'anneau qui en la regardant est parcourue par le courant électrique dans le sens des aiguilles d'une montre et la face Nord et celle qui, en la regardant est parcourcue par le courant électrique dans le sens contraire des aiguilles d'une montre ( fig.10-3)




c. Détermination de la polarité de la bobine b. Sens du champ au centre de la bobine

**Figure (10-3)**

Champ magnétique d'une bobine circulaire

- Pour étudier la forme des lignes du flux magnétique :

  1. Prenons une plaque en carton horizontale, qui passe par le centre d'un anneau circulaire vertical traversé par un courant.

  2. Saupoudrons la plaque avec de la limaille de fer et tapons légèrement sur le carton pour libérer les grains de fer de la friction.

3. Nous remarquons que :
   - Les lignes de flux ne sont plus circulaires
   - La densité du flux magnétique varie d'un point à un autre.
   - Les lignes de flux, autour de l'axe de la bobine, sont droites et parallèles, ce qui signifie que dans cette région le champ magnétique est uniforme

**Formule :**

- On calcule la densité B du flux magnétique engendrée au centre d'une bobine circulaire de rayon r et formée de N spires traversées par un courant d'intensité I par la formule

$$B = \frac{\mu N I}{2r} \quad \text{( I en ampère et r en mètre)} \quad (10\text{-}2)$$

où $\mu$ est le coefficient de perméabilité magnétique du milieu au centre de la bobine. ( $\mu_{air} = 4\pi \times 10^{-7}$ wb/A.m)

- De cette formule nous pouvons déduire que la densité du flux au centre de la bobine circulaire dépend de trois facteurs :

   1. son nombre de spires N : $B \propto N$
   2. l'intensité I du courant qui la traverse : $B \propto I$
   3. son rayon r : $B \propto \frac{1}{r}$

## Détermination du sens du champ magnétique au centre d'une bobine circulaire :

### 1- Règle des aiguilles d'une montre :

La face où le courant circule dans le même sens que celui des aiguilles d'une montre est un pôle Sud, alors que celle où le courant circule en sens contraire de celui des aiguilles d'une montre est un pôle Nord, figure (10-3).
Ainsi une bobine circulaire traversée par un courant agit comme un aimant court ayant une face Nord et une face Sud qu'on appelle "dipôle magnétique"
Il est à noter qu'il n'existe pas dans la nature un pôle N ou un pôle S isolé.

## 2- Règle du tire-bouchon de la main droite :

Faisons tour ner le manche d'un t ire-bouchon dans le sens du courant, le sens de progression de la vis donne le sens des lignes du flux (figures 10-4 et 10-5).

**Figure (10-4)**
Sens de progression de la vis

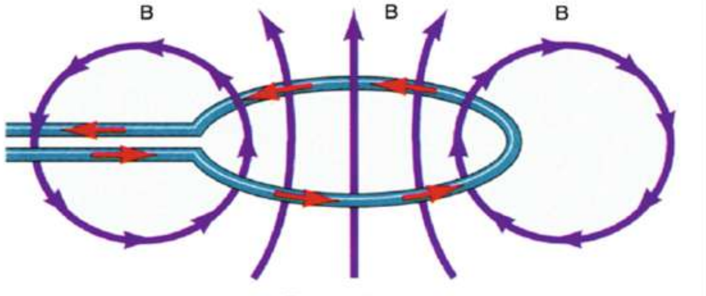



**Figure (10-5)**
Règle du tire-bouchon
Bobine circulaire traversée par un courant (le sens de progression de la vis donne le sens des lignes du flux)

**Exemple :**

***Calculer la densité du flux magnétique au centre d'une bobine circulaire, de 11 cm de rayon, formée de 20 spires et traversée par un courant de 1,4 A d'intensité, sachant que $\mu$ air = $4\pi \times 10^{-7}$ Wb/A.m ($\pi = 22/7$)***

**Solution :**

$$B = \frac{\mu NI}{2r} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 20 \times 1,4}{2 \times 0,11} = 16 \times 10^{-5} \text{ Tesla}$$

## Champ magnétique d'un courant traversant un solénoïde: (ou une bobine en spirale)

- Si les extrémités d'un solénoïde sont reliées à une source de courant électrique, un champ magnétique est engendré comme l'indique la figure (10-6). Ce champ ressemble à celui d'un barreau aimanté
- La figure (10-6a) montre que les lignes du flux près de l'axe sont parallèles (c.à.d. que le champ magnétique est uniforme). Loin de l'axe les lignes de flux ont des trajectoires fermées et continues.

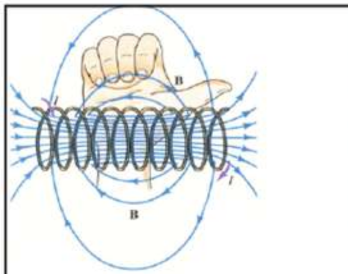


**Figure (10-6) :** Champ magnétique d'un courant traversant un solénoïde
b. Détermination de la polarité du champ en utilisant la règle d'Ampère de la main droite
a. Formation des lignes du flux

- L'extrémité de la bobine par où sortent les lignes du flux magnétique, est le pôle Nord et celle où elles entrent est le pôle Sud

**Formule :**

La densité du flux magnétique en un point situé à l'intérieur et sur l'axe d'un solénoïde, traversé par un courant, dépend de :

1. L'intensité I du courant qui le traverse : $B \propto I$

2. Le nombre de spires n par unité de longueur : $B \propto n$ ($n = \frac{N}{\ell}$)

Donc $B \propto nI$

D'où $B = \mu nI$

Ou $\boxed{B = \frac{\mu NI}{\ell}}$ (10-3)

Où N est le nombre de spires et $\ell$ est la longueur du solénoïde.

- Pour déterminer les deux pôles d'un solénoïde, on utilise la règle de tire-bouchon, en considérant que le solénoïde est formé de plusieurs bobines circulaires ayant le même axe (figure 10-6b)

**Exemples :**

***1. Un solénoïde, formé de 800 spires, est traversé par un courant d'intensité 0,7A. Calculer la densité du flux magnétique en un point à l'intérieur et sur son axe sachant que sa longueur = 20 cm***

**Solution :**

$$B = \frac{\mu NI}{\ell}$$

$$B = \frac{4 \times 22 \times 10^{-7} \times 800 \times 0,7}{7 \times 0,2} = 3,52 \times 10^{-3}\ T$$

***2. Calculer l'intensité du courant qui doit traverser le solénoïde de l'exemple précédent pour que la densité de flux soit 0,815 tesla si on introduit à l'intérieur un noyau en fer. ($\mu_{fer} = 1,63 \times 10^{-2}$ wb/A.m)***

**Solution :**

$$B = \frac{\mu NI}{\ell}$$

$$0,815 = \frac{1,63 \times 10^{-2} \times 800 \times I}{0,2}$$

$$\therefore\ I = \frac{0,815 \times 0,2}{1,63 \times 10^{-2} \times 800} = 0,0125A$$

## Force agissant sur un fil traversé par un courant et placé dans un champ magnétique :

• Si l'on place un fil droit traversé par un courant entre les deux pôles d'un aimant en fer à cheval, il subit une force dont le sens est perpendiculaire à celui du courant et à celui du champ (figure 10-7).

• Le sens du mouvement du fil est inversé si on inverse le sens du courant ou celui du champ. Dans tous les cas, le sens du mouvement est perpendiculaire à celui du courant et à celui du champ.

• Pour déterminer le sens de cette force, on utilise la règle de Fleming de la main gauche.

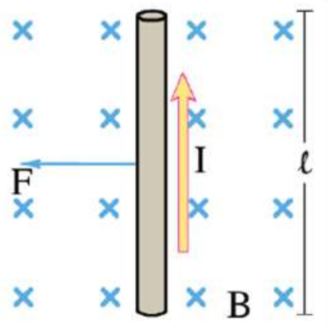



**Figure (10-7)**
Force agissant sur un fil traversé par un courant et placé dans un champ magnétique

## Règle de Fleming de la main gauche :

"Plaçons le pouce, l'index et le majeur de la main gauche dans trois directions perpendiculaires l'une à l'autre de telle sorte que l'index pointe dans le sens du champ et le majeur pointe dans le sens du courant. Le pouce indique alors le sens de la force ou le sens du mouvement du fil figure (10-8).

**Formule:**

Les facteurs dont dépend cette force :

1. La longueur ($\ell$) du fil ;
   F est proportionnelle à $\ell$ : $F \propto \ell$
2. L'intensité (I) du courant ;
   F est proportionnelle à I : $F \propto I$
3. La densité (B) du flux magnétique ;
   F est proportionnelle à B : $F \propto B$

Ainsi $F \propto BI\ell$ ou $F = cte \times BI\ell$

**Figure (10-8)**
Règle de Fleming de la main gauche

• On a choisi l'unité de la densité de flux magnétique qui est le tesla, comme étant la densité du flux qui engendre une force d'un newton sur un fil d'un mètre de longueur lorsqu'il est traversé par un courant d'un ampère d'intensité

D'où 1 tesla = 1 weber/ $m^2$ = 1 N/A.m

Ainsi $F = cte \times BI\ell \rightarrow 1 = cte \times 1 \times 1 \times 1$ d'où cte = 1 et

$$\boxed{F = BI\ell \text{ (Newton)}} \qquad (10\text{-}4) \qquad \text{Ou } B = \frac{F}{I\ell}$$

**Le tesla :** (l'unité de la densité du flux magnétique)
C'est la densité du flux magnétique qui engendre une force d'un newton sur un fil d'un mètre de longueur, lorsqu'il est traversé par un courant d'un ampère d'intensité perpendic ulaire aux lignes du flux magnétique.

## Formule générale :

• Si le fil traversé par un courant d'intensité I fait un angle θ avec le champ magnétique, on décompose B en deux composantes perpendiculaires :

• La composante $B\cos\theta$ qui est parallèle au fil et qui n'a aucun effet sur lui.

• La composante $B\sin\theta$ perpendiculaire au fil qui agit sur lui et qui engendre une force $F = (B\sin\theta)I\ell = BI\ell\sin\theta$

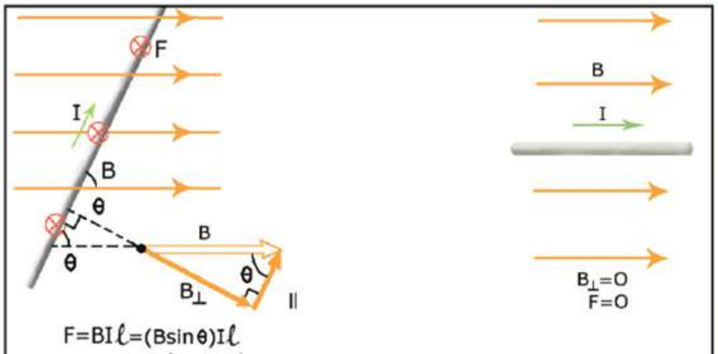



**Figure (10-9)**
Fil traversé par un courant qui fait un angle θ avec le champ magnétique
a. Si θ = 0 (le courant et le champ ont même sens), la force s'annule
b. Si θ ≠ 0 une force agit sur le fil

• De cette relation, on peut déduire que la force s'annule si le fil est parallèle au champ ($\theta = 0^\circ$ ou $\theta = 180^\circ$)

• On peut déduire le sens de cette force dans différents cas, en tenant compte que le symbole □ signifie que le courant traverse le fil vers l'extérieur et le symbole ⊗ signifie que le courant traverse le fil vers l'intérieur.

## Force entre deux fils parallèles, traversés par des courants :

• Si deux fils parallèles séparés par une distance d sont traversés par des courants d'intensités $I_1$ et $I_2$, une force agit sur chacun d'eux.

• Cette force est attractive si les courants vont dans le même sens et elle est répulsive si les courants sont de sens contraires.

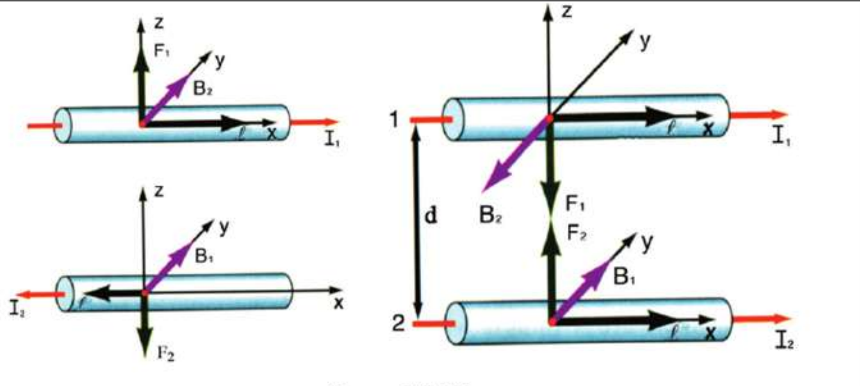



Figure (10-10)

b. Les courants sont opposés a. Les courants ont même sens

**Formule :**

• Le fil (1) de longueur $\ell$ et traversé par le courant $I_1$ est exposé au champ magnétique

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d} \text{ du fil (2)}$$

($\mu_0$ est le coefficient de perméabilité magnétique de l'air)

• La force agissant sur le fil (l) est :

$$F_1 = B_2 I_1 \ell$$

$$= \left(\frac{\mu_0 I_2}{2\pi d}\right) I_1 . \ell$$

donc $\mathbf{F_1} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \ell$ et $F_2 = F_1$

**Exemples :**

***1. Un fil droit de longueur 30 cm, traversé par un courant d'intensité 4A est placé perpendiculairement à un champ magnétique. Si le fil subit une force de 6N, calculer la densité du flux magnétique***

**Solution :**

$F = BI\ell$

$6 = B \times 4 \times 0,3$

$\therefore B = \frac{6}{4 \times 0,3} = 5 \text{ Tesla}$

***2. Dans l'exemple précédent, calculer la force si l'angle compris entre le fil et le champ = 30°***

**Solution :**

$F = BI\ell\sin\theta = 5 \times 4 \times 0,3 \times \sin 30^o$

$F = 3N$

## Forces et moment du couple agissant sur une bobine rectangulaire traversée par un courant et placée dans un champ magnétique

• Soit une bobine rectangulaire abcd (figure 10-11), placée dans un champ magnétique de telle sorte que son plan soit parallèle aux lignes du flux magnétique.

• Les deux côtés bc et ad ne subissent pas de force car ils sont parallèles au champ.

• Les deux côtés ab et cd sont perpendiculaires au champ ; ils subissent deux forces de même intensité, opposées, non alignées, ayant chacune une valeur F tel que $F = BI\ell_{cd}$ où la distance perpendiculaire entre elles est $\ell_{ad}$ ou $\ell_{bc}$.

• Les deux forces forment un couple qui fait tourner la bobine autour de son axe.

$\therefore$ le moment du couple $\tau = F \times \ell_{bc}$

$\tau = BI\ell_{cd} . \ell_{bc} = BIA$

où A est l'aire de section de la bobine $= \ell_{cd} . \ell_{bc}$

• Si la bobine est formée de N spires, le moment du couple résultant devient

$$\boxed{\tau = NBIA = B \times \overrightarrow{m_d}} \qquad (10\text{-}5)$$

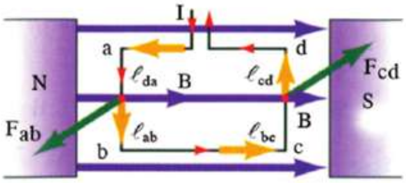
où $\overrightarrow{m_d}$ = NIA est le moment du dipôle magnétique qui est une grandeur vectorielle perpendiculaire à la surface (normale) dans le sens de progression de la vis du tire-bouchon lorsque son manche tourne dans le sens du courant.

• Ainsi si le plan de la bobine est perpendiculaire au champ, la normale devient parallèle à ce champ et le moment du couple s'annule (les deux forces deviennent alignées)

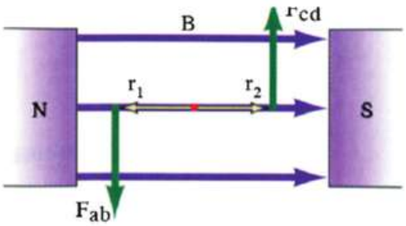
• Si le plan de la bobine est incliné par rapport au champ, le moment du couple devient $\boxed{\tau = NBIA\sin\theta}$ (N.m)

Où θ est l'angle compris entre la normale au plan de la bobine (qui est le sens du moment du dipôle magnétique) et les lignes du flux magnétique.

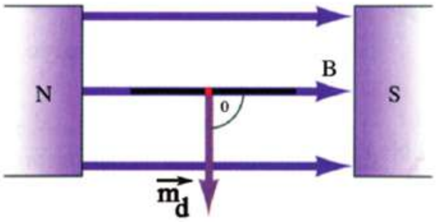
• Ce couple engendré sur une bobine traversée par un courant et placée perpendiculairement à un champ magnétique est le principe de fonctionnement des appareils de mesures électriques et du moteur que nous étudierons dans le chapitre (11).



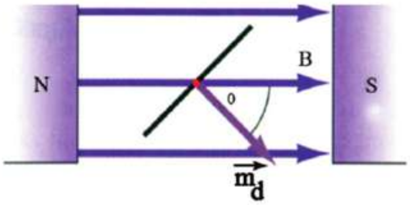

b) Vue d'en haut quand la bobine est parallèle au champ



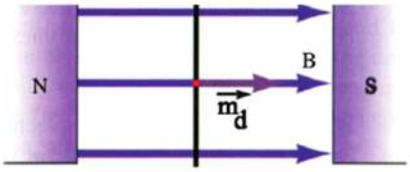

a) La bobine est parallèle au champ




c) Vue d'en haut quand le moment du dipôle magnétique est perpendiculaire au champ




e) Vue d'en haut quand la bobine est perpendiculaire au champ c.à.d. le moment du dipôle magnétique est parallèle au champ et le moment = 0

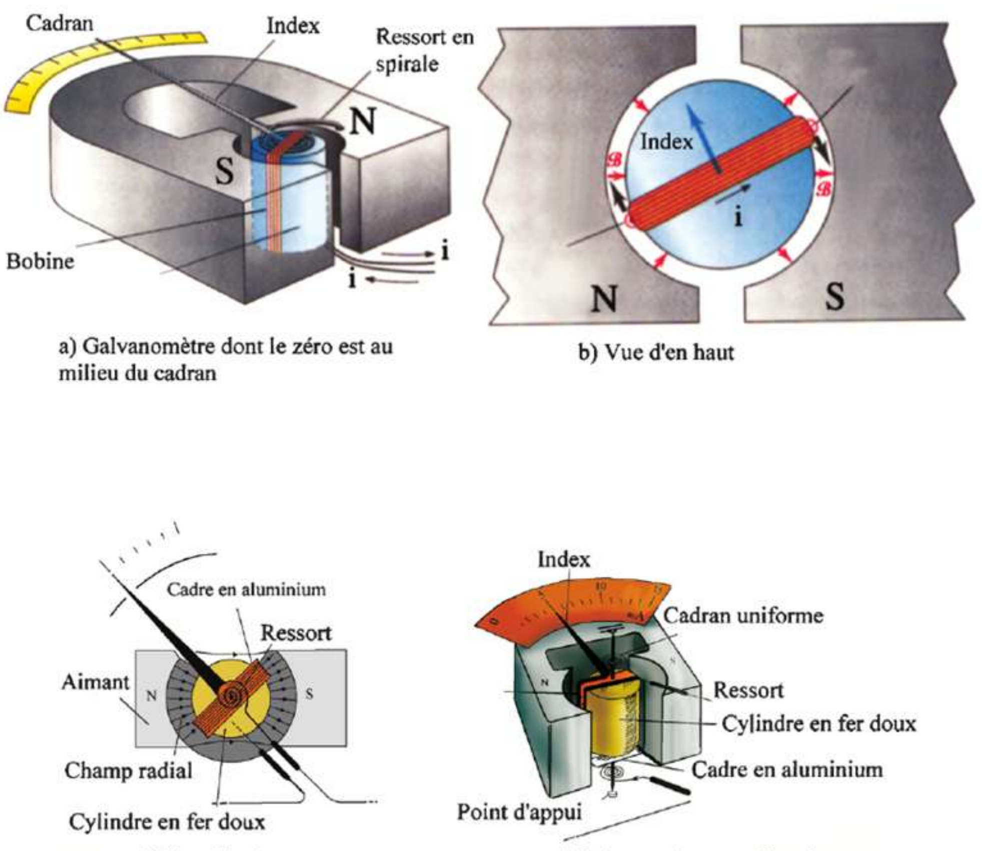



d) Vue d'en haut quand le moment du dipôle magnétique fait un angle θ avec le champ

**Figure (10-11)**
Moment du couple dans une bobine traversée par un courant électrique

## Applications : Appareils de mesures électriques
## Galvanomètre à cadre mobile (ou galvanomètre sensible)

- Utilisé pour détecter et dans un circuit donné déterminer la valeur et le sens d'un courant de très faible intensité.
- Son principe de fonctionnement est basé sur le moment du couple agissant sur une bobine, traversée par un courant et placée dans un champ magnétique




a) Galvanomètre dont le zéro est au milieu du cadran

b) Vue d'en haut

d) Vue d'en haut

c) Galvanomètre transformé en milliampèremètre

**Figure (10-12)**
Schémas du galvanomètre

## Description :

Les parties essentielles du galvanomètre sont indiquées sur la figure (10-12). Il comprend :

- Une bobine rectangulaire formée d'un fil mince enroulé autour d'un cadre léger en aluminium qui peut tourner autour d'un axe. Un cylindre fixe en fer doux est placé à l'intérieur du cadre.
- La bobine repose sur deux supports en agate et elle est placée entre les deux pôles d'un aimant puissant en fer à cheval à pôles concaves.
- Deux ressorts en spirale contrôlent le mouvement de la bobine et servent aussi de conducteurs pour l'entrée et la sortie du courant
- D'après le sens du courant dont l'intensité est à mesurer, la bobine et l'index qu'elle porte tourneront dans le même sens ou en sens contraire de celui des aiguilles d'une montre.
- Le cylindre en fer doux et les deux pôles concaves de l'aimant font que les lignes du flux magnétique entre eux prennent la direction des rayons de cercle (champ radial). Ceci fait que le champ magnétique dans la portion de l'espace où tourne le cadre devient constant. Ce champ radial rend le plan de la bobine parallèle aux lignes du flux agissant sur elle. Ainsi la normale est toujours perpendiculaire au champ magnétique
  $\tau = NBIA\sin 90^\circ = NBIA$
  Ainsi $\tau \propto I$ et la graduation du cadran est uniforme

## Fonctionnement :

- Lorsque le courant dont l'intensité est à mesurer traverse le cadre ; les forces magnétiques engendrent sur la bobine un couple qui la fait tourner ainsi que l'index, dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre. Ce couple a un moment $\tau_1 = NBIA$
- Les deux ressorts freinent le mouvement de la bobine en engendrant un couple de sens contraire à celui du mouvement des aiguilles d'une montre. Ce couple a un moment $\tau_2$
- La bobine et l'index se stabilisent dans une position déterminée lorsque les moments des deux couples s'annulent : $\tau_1 = \tau_2$. A ce moment l'index indique la valeur du courant
- Si on inverse le sens du courant dans la bobine, l'index dévie en sens contraire du sens précédent.

## Sensibilité du galvanomètre :

La sensibilité d'un galvanomètre est mesurée par l'angle de déviation de son index quand sa bobine est traversée par une unité d'intensité de courant

$$\boxed{S = \frac{\theta}{I}} \qquad (10\text{-}6)$$

Elle se mesure en degré/$\mu$A.

## Applications sur le galvanomètre :

### 1) L'ampèremètre à courant continu :

- Le galvanomètre ne peut mesurer que des courants de très faible intensité à cause de sa très grande sensibilité. Il est donc nécessaire d'augmenter sa limite de mesure.
- L'ampèremètre est formé d'un galvanomètre à cadre mobile dont la bobine est reliée en parallèle à une très petite résistance appelée "shunt" ou "diviseur de courant" (figure 10-13)
- L'ampèremètre est relié en série avec le conducteur dont on veut mesurer l'intensité du courant qui le traverse.
- Après avoir gradué son cadran, l'ampèremètre mesure directement l'intensité du courant qui le traverse.

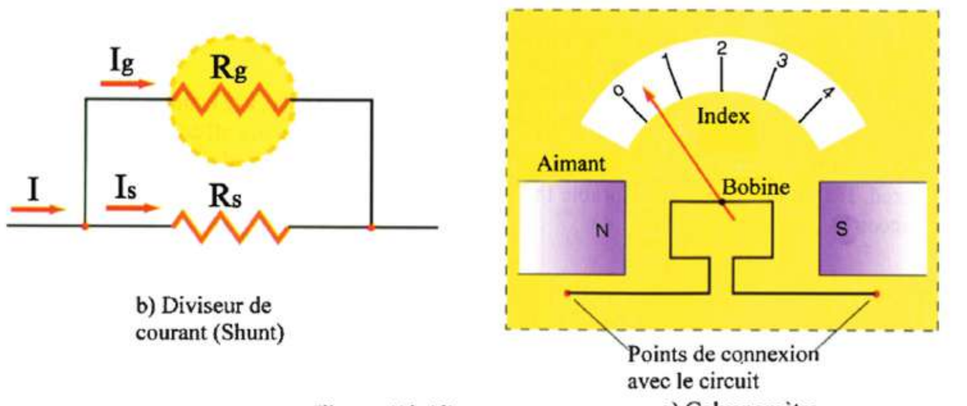



**Figure (10-13)**
Transformation du galvanomètre en ampèremètre

**Formule :**

- Soit I l'intensité maximale (ou une intensité quelconque) du courant à mesurer avec l'ampèremètre. La majeure partie de ce courant d'intensité $I_s$ traverse le shunt de résistance $R_s$ et une très faible partie d'intensité $I_g$ traverse le galvanomètre de résistance $R_g$.

- On a donc, $I = I_g + I_s$
  ou $I_s = I - I_g$

- $R_s$ et $R_g$ étant reliées en parallèle, la d.d.p. entre leurs bornes est la même. Par suite :

$$I_g \times R_g = I_s \times R_s$$

Ou $$R_s = \frac{I_g \times R_g}{I_s}$$

- Remplaçons $I_s$ par sa valeur, on a $\boxed{R_s = \frac{I_g \times R_g}{I - I_g}}$ (10-7)

Pour augmenter la limite de mesure d'un ampèremètre, il faut diminuer la résistance du shunt

**• La très petite résistance du shunt permet :**

1. de faire passer la majeure partie du courant total dans le shunt, ce qui préserve le galvanomètre.
2. d'augmenter la limite de mesure du galvanomètre et de diminuer ainsi sa sensibilité.
3. de rendre très petite la résistance totale de l'ampèremètre, ce qui est nécessaire pour ne pas modifier l'intensité du courant dans le circuit auquel il est relié en série.

### Exemple :

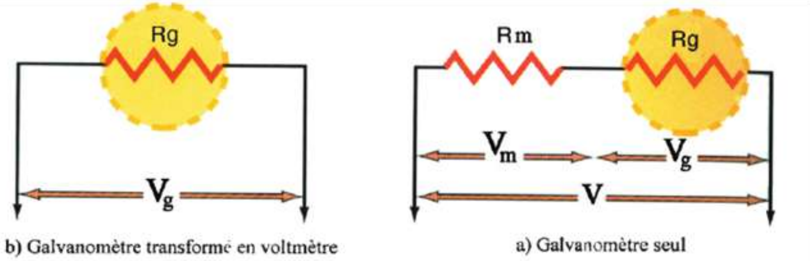
***Un galvanomètre de 2Ω de résistance a une limite de mesure de 5mA. Calculer la résistance du shunt nécessaire pour le transformer en un ampèremètre dont la limite de mesure est 10A***

**Solution :**

$$R_s = \frac{I_g \times R_g}{I - I_g} = \frac{0{,}005 \times 2}{10 - 0{,}005} \Rightarrow R_s = \frac{0{,}001}{9{,}995} = 0{,}001\ \Omega$$

## 2) Le voltmètre (mesure de la d.d.p. d'un courant continu)

- Le galvanomètre ne peut mesurer entre ses bornes que des d.d.p. ($V_g = I_g \cdot R_g$) excessivement faibles à cause du produit $I_g \cdot R_g$ qui est très faible, même si l'index dévie jusqu'à la limite du cadran
- Il est donc nécessaire d'augmenter sa résistance pour augmenter sa limite de mesure d'une d.d.p.
- Le voltmètre est formé d'un galvanomètre dont la bobine est reliée en série à une très grande résistance appelée " multiplicateur de potentiel" (figure 10-14).
- Le voltmètre est relié en parallèle avec le conducteur dont on veut mesurer la d.d.p. entre ses bornes.



b) Galvanomètre transformé en voltmètre    a) Galvanomètre seul

**Figure (10-14)**
Transformation du galvanomètre en voltmètre

**Formule :**

- Soit $R_g$ la résistance du galvanomètre, $R_m$ la résistance du multiplicateur de potentiel qui est reliée en série, $I_g$ l'intensité maximale (ou une intensité quelconque) traversant ($R_g$ et $R_m$)
- Si V est la d.d.p. à mesurer, on a
  $V = I_g \times R_g + I_g \times R_m$ ou $V = I_g (R_g + R_m)$
- On a aussi : $V = V_g + I_g \times R_m$ d'où $V - V_g = I_g \times R_m$

ou $$\boxed{R_m = \frac{V - V_g}{I_g}} \qquad (10\text{-}8)$$

- Pour augmenter la limite de mesure du voltmètre il faut augmenter la résistance du multiplicateur.

- **La grande résistance du multiplicateur de potentiel fait que:**
  1. Le voltmètre est traversé par une faible intensité de courant ce qui préserve le galvanomètre.
  2. Il a une plus grande limite de mesure de la d.d.p.
  3. Il prend une très faible partie du courant traversant le circuit principal, ce qui ne modifie pas la d.d.p. qu'il mesure entre les bornes du conducteur auquel il est relié en parallèle.

**Exemple :**

***Un galvanomètre de 0,1Ω de résistance a une limite de mesure de 1mA. Calculer la résistance du multiplicateur de potentiel nécessaire pour le transformer en voltmètre dont la limite de mesure est 5V. Quelle est la résistance totale de ce voltmètre ?***

**Solution :**

$V_g = I_g.R_g = 0,001 \times 0,1 = 1 \times 10^{-4}$ V

$$R_m = \frac{V - V_g}{I_g} = \frac{5 - 1\times 10^{-4}}{1\times 10^{-3}} = 49999,9\Omega$$

∴ la résistance totale de voltmètre devient

$R_{totale} = 49999,9 + 0,1\ \Omega = 50000\Omega$

## 3) L'ohmmètre :

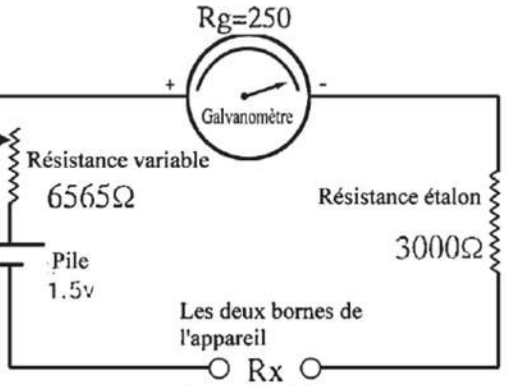



**Figure (10-15)**
Circuit du calibrage de l'ohmmètre

- La mesure d'une résistance inconnue est basée sur l'in tensité I du courant qui la traverse et la d.d.p. V entre ses bornes.

  $R = \frac{V}{I}$ (Loi d'Ohm)

- Si la d.d.p. est constante et connue, on peut se passer du voltmètre et étalonner le galvanomètre pour donner une mesure directe de la résistance. Plus la résistance augmente et plus l'intensité du courant diminue.

- Ce galvanomètre étalonné (ou calibré) est appelé "Ohmmètre"

- L'Ohmmètre est formé (figure 10-15) d'un microampèremètre dont la limite de mesure est 400 µA et de résistance 250Ω, relié en série avec une résistance étalon de 3000Ω, un rhéostat dont la résistance maximale est 6525Ω et une pile de f.é.m. 1,5V et de résistance interne négligeable.

- Si on met en contact les deux extrémités de l'appareil ($R_x = 0$), un courant circule dans le circuit.
  Lorsque l'index dévie jusqu'au bout du cadran, il faut prendre du rhéostat une résistance de valeur $R_1 = 500\Omega$ calculée de la manière suivante :

  $$I_{max} = \frac{V_B}{R_g + R_e + R_1} \rightarrow 400 \times 10^{-6} = \frac{1,5}{250 + 3000 + R_1}$$

  $$\Rightarrow R_1 = 500\ \Omega$$

- Si on relie une résistance $R_x$ dans le circuit, l'intensité du courant diminue et la déviation de l'index n'est plus maximale.

- Nous pouvons calibrer l'appareil de la manière suivante :

1. Si $R_x = 0$ ; $I = 400\mu A = I_{max}$
2. Si $R_x = 3750\Omega$ ; $R_{totale} = 250 + 3000 + 500 + 3750 = 7500\ \Omega$

   $I = \frac{1,5}{7500} = 2x10^{-4} A = 200\mu A.$

   L'index dévie jusqu'à la moitié du cadran.
3. Si $R_x = 7500\Omega$ ; $R_{totale} = 11250\Omega$;

   $I = \frac{400}{3} \mu A.$

   L'index dévie jusqu'au tiers du cadran
4. Si $R_x = 11250\Omega$ ; $R_{totale} = 15000\Omega$ ; $I = 100\mu A$

   l'index dévie jusqu'au quart du cadran
5. Si $R_x = \infty$ ; $I = 0$

- La graduation du cadran de l'ohmmètre (figure 10-16) est inversée par rapport à celle du galvanomètre c.à.d. que lorsque $R_x = 0$, I est maximum et lorsque $R_x = \infty$, $I = 0$. Ainsi plus la résistance augmente et plus la déviation de l'index diminue.

- La graduation du cadran de l'ohmmètre e st irrégulière, c.à.d. que les lignes de la graduation sont écartées à droite et serrées à gauche.

| Rx (Ω) | I (μA) |
|---|---|
| 0 | 400 |
| 3750 | 200 |
| 11250 | 100 |
| ∞ | 0 |

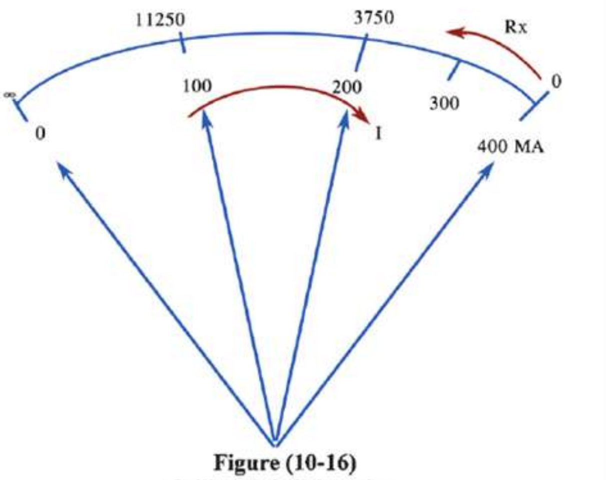



**Figure (10-16)**
Calibrage de l'ohmmètre

- Les appareils de mesure basés sur la lecture de l'index devant un cadran gradué sont appelés "analogues" (figure 10-17). D'autres basés sur la lecture de nombres sur un écran (sans index), sont appelés " numériques " (digital).

- Tous les appareils mesurant la d.d.p. ou l'intensité d'un courant continu à sens unique sont des (CC/Multimè tre). Si la d.d.p. ou le courant sont alternatifs, les appareils utilisés sont des (CA/Multimètre).

**Figure (10-17)**
Multimètre analogue

**Figure (10-18)**
Multimètre numérique

# Résumé

**Définitions et concepts fondamentaux :**

- Un champ magnétique est engendré autour d'un fil rectiligne traversé par un courant électrique.
- La densité du flux magnétique engendrée par le passage d'un courant dans un fil rectiligne augmente lorsque :
  1. on s'approche du fil
  2. on augmente l'intensité du courant électrique
- Nous pouvons déterminer le sens du champ magnétique engendré par le passage d'un courant dans un fil rectiligne par la règle de la main droite d'Ampère.
- Le champ magnétique engendré par le passage du courant dans un fil enroulé en forme d'un anneau circulaire ressemble à celui du champ obtenu par un aimant court.
- La densité du flux magnétique au centre d'une bobine circulaire, traversée par un courant électrique, dépend de :
  a) Son nombre de spires.
  b) L'intensité du courant qui la traverse.
  c) Son rayon.
- Nous pouvons déterminer le sens du champ magnétique au centre d'une bobine circulaire, traversée par un courant, par la règle du tire-bouchon de la main droite.
- Le champ magnétique engendré par le passage du courant dans un fil enroulé en forme de spirale (solénoïde) ressemble à celui du champ obtenu par un barreau aimanté.
- La densité du flux magnétique en un point situé à l'intérieur et sur l'axe d'un solénoïde dépend :
  a) De l'intensité du courant qui le traverse
  b) Du nombre de spires par unité de longueur
- Nous pouvons déterminer les deux pôles d'un solénoïde traversé par un courant par la règle du tire-bouchon de la main droite.
- Les unités de mesure de la densité du flux magnétique sont le tesla ou weber/$m^2$ ou N/Am
- Les facteurs dont dépend la force agissant sur un fil, traversé par un courant électrique et placé dans un champ magnétique sont :
  a) La longueur du fil.
  b) L'intensité du courant.
  c) La densité du flux magnétique.
  d) L'angle compris entre le fil et le sens du champ magnétique.

- Le galvanomètre à cadre mobile est un appareil utilisé pour détecter la présence de courants de très faibles intensités dans un circuit, pour mesurer leurs intensités et déterminer leurs sens.
- Le principe de fonctionnement du galvanomètre à cadre mobile repose sur le couple agissant sur une bobine traversée par un courant et placée dans un champ magnétique.
- La sensibilité d'un galvanomètre est mesurée par l'angle de déviation de son index lorsque sa bobine est traversée par un courant d'une unité d'intensité
- L'ampèremètre est un appareil utilisé pour mesurer directement l'intensité du courant dans un circuit après avoir calibré sa graduation. Il est formé d'un galvanomètre à cadre mobile dont la bobine est reliée en parallèle avec une très petite résistance appelée shunt ou diviseur de courant.
- La résistance totale de l'ampèremètre (avec le shunt) est très faible et ceci pour ne pas varier sensiblement l'intensité du courant à mesurer dans le circuit auquel il est relié en série.
- Le voltmètre est un appareil utilisé pour mesurer la d.d.p. entre deux points d'un circuit électrique. Il est formé d'un galvanomètre à cadre mobile dont la bobine est reliée en série avec une très grande résistance appelée multiplicateur de potentiel.
- La grande résistance du voltmètre lui permet de prendre une très faible partie du courant traversant le circuit principal ce qui ne modifie pas la d.d.p. qu'il mesure entre les bornes du conducteur auquel il est relié en parallèle.
- L'ohmmètre est un appareil utilisé pour mesurer la valeur d'une résistance inconnue.
- L'ohmmètre est formé d'un microampèremètre (galvanomètre) relié en série avec une résistance fixe (étalon), une résistance variable et une pile de f.é.m. 1,5V. Son index dévie au maximum lorsqu'on relie directement ses deux bornes (sans résistance). Lorsqu'on relie la résistance inconnue aux bornes de l'ohmmètre, l'intensité du courant diminue. Le cadran est gradué en ohm ce que nous permet d'obtenir une mesure directe de la résistance.

**Formules importantes :**

- La densité B du flux magnétique en un point distant d mètre d'un fil traversé par un courant électrique d'intensité I ampère est calculée par la formule

$$B = \frac{\mu I}{2\pi d} \quad (\text{weber/m}^2 \text{ ou tesla ou N/A.m})$$

- La densité B du flux magnétique au centre d'une bobine circulaire de rayon r, traversée par un courant d'intensité I et formée de N spires est calculée par la formule

$$B = \frac{\mu N I}{2r} \quad (\text{weber/m}^2 \text{ ou tesla ou N/A.m})$$

- La densité B du flux magnétique en un point situé à l'intérieur et sur l'axe d'un solénoïde formé de N spires de longueur $\ell$ et traversé par un courant d'intensité I est calculée par la formule

$$B = \frac{\mu N I}{\ell} \quad \text{(weber/m}^2\text{ ou tesla ou N/A.m)}$$

- La force agissant sur un fil de longueur $\ell$, traversée par un courant d'intensité I et placé dans un champ magnétique de densité de flux B est

$$F = BI\ell\sin\theta$$

où $\theta$ est l'angle compris entre le fil et le sens du champ magnétique

- Le moment du couple agissant sur une bobine rectangulaire d'aire de section A, formée de N spires, traversée par un courant d'intensité I et placée parallèlement à un champ magnétique de densité de flux B est calculée par la formule :

$$\tau = NBIA = \overrightarrow{m_d}.B \qquad \text{(en N.m)}$$

où $\overrightarrow{m_d} = NIA$ est le moment du dipôle magnétique

- La résistance du shunt dans l'ampèremètre est calculée par la formule

$$R_s = \frac{I_g.R_g}{I - I_g}$$

où $R_s$ est la résistance du shunt, $I_g$ est l'intensité maximale du courant qui peut traverser le galvanomètre, $R_g$ est la résistance de la bobine de galvanomètre et I est l'intensité maximale du courant à mesurer avec l'ampèremètre

- La résistance du multiplicateur de potentiel dans le voltmètre est calculée par la formule :

$$R_m = \frac{V - V_g}{I_g}$$

où $R_m$ est la résistance de multiplicateur de potentiel, V est la d.d.p. à mesurer, $V_g$ est la d.d.p. entre les bornes du galvanomètre et $I_g$ est l'intensité maximale du courant qui peut traverser le galvanomètre

## Questions et exercices

1) Quels sont les facteurs dont dépend la densité du flux magnétique dans chacun des cas suivants :

   a) Autour d'un fil rectiligne traversé par un courant électrique
   b) Au centre d'une bobine circulaire traversée par un courant électrique
   c) En un point situé à l'intérieur et sur l'axe d'un solénoïde.

2) Quels sont les facteurs dont dépend la force agissant sur un fil, traversé par un courant d'intensité I et placé perpendiculairement à un champ magnétique.

3) Démontrer que la force agissant sur un fil de longueur $\ell$, traversé par un courant d'intensité I et placé perpendiculairement à un champ magnétique de densité de flux B est calculée par la formule $F = BI\ell$.

4) Démontrer que le moment du couple agissant sur une bobine formée de N spires, d'aire de section A, traversée par un courant d'intensité I et placée parallèlement à un champ magnétique de densité de flux B est calculé par la formule $\tau = NBIA$

5) Décrire avec un schéma la composition d'un galvanomètre sensible
   Quel est son principe de fonctionnement ?

6) Expliquer comment l'on peut transformer le galvanomètre sensible en ampèremètre et déduire la formule utilisée.

7) Expliquer comment l'on peut transformer le galvanomètre sensible en voltmètre et déduire la formule utilisée.

8) Commenter :
   a) La présence d'un cylindre en fer doux à l'intérieur de la bobine du galvanomètre.
   b) La bobine d'un galvanomètre est reliée à un ressort en spirale.
   c) Pour utiliser le galvanomètre à cadre mobile comme voltmètre, on relie sa bobine en série avec une très grande résistance.
   d) L'ampèremètre est relié en série dans le circuit tandis que le voltmètre est relié en parallèle.
   e) Une résistance étalon est reliée à l'ohmmètre.
   f) La f.é.m. de la pile reliée à l'ohmmètre doit être constante.

9) Que veut-on dire par les résistances suivantes :
Le multiplicateur de potentiel – le diviseur de courant
Quel est le rôle de chacune ? Déduire la formule de chacune.

10) Expliquer comment utiliser le galvanomètre à cadre mobile pour mesurer :
a) Une intensité de courant (assez grande).
b) Une f.é.m.
c) Une résistance électrique.

11) Une bobine d'aire de section 0,2 $m^2$ est placée perpendiculairement à un champ magnétique uniforme dont la densité du flux est 0,04 weber/$m^2$. Calculer le flux magnétique qui la traverse. (Réponse : 0,008 weber)

12) Un fil de 10cm de longueur, traversé par un courant de 5A d'intensité est placé dans un champ magnétique de densité 1 tesla. Calculer la force agissant sur ce fil dans les cas suivants :

a) S'il est perpendiculaire au champ magnétique (Réponse : 0,5N)
b) S'il forme un angle de 45° avec le champ (Réponse : 0,356N)
c) S'il est parallèle au champ magnétique (Réponse : zéro)

13) Un fil rectiligne de 2 mm de diamètre est traversé par un courant de 5A d'intensité. Calculer la densité du flux magnétique en un point situé dans l'air à 0,2 m du fil. (Réponse : $5 \times 10^{-6}$ T)

14) Une bobine circulaire de 0,1 m de rayon est traversée par un courant de 10A d'intensité. Calculer la densité du flux magnétique au centre si elle est formée d'une seule spire. (Réponse : $2\pi \times 10^{-5}$ T)

15) Un solénoïde de 50 cm de longueur, formé de 4000 spires est traversé par un courant de 2A d'intensité. Calculer la densité du flux magnétique en un point situé à l'intérieur et sur son axe. (Réponse : 0,02 T)

16) Une bobine rectangulaire de 12 cm de longueur et de 10 cm de largeur, formée de 50 spires, traversée par un courant de 3A d'intensité est placée dans un champ magnétique uniforme de densité 0,4 tesla. Calculer le moment du couple agissant sur cette bobine lorsque son plan est parallèle au champ. (Réponse : 0,72N.m)

17) La bobine d'un galvanomètre d'aire de section (12 × 5) $cm^2$ et formée de 600 spires est placée dans un champ magnétique de densité 0,1 Tesla. Calculer l'intensité du courant nécessaire pour engendrer un couple de moment 1N.m

(Réponse : 2,78A)

18) Une bobine formée de 500 spires, traversée par un courant de 10A d'intensité est placée dans un champ magnétique de densité 0,25 Tesla. Si son aire de section est 0,2 $m^2$, calculer le moment de couple agissant sur cette bobine si la normale à son plan fait avec le champ magnétique un angle de 30° (Réponse : 125N.m)

19) Un ampèremètre de 0,5 Ω de résistance peut supporter un courant maximal de 40mA. Calculer la résistance du shunt nécessaire pour qu'il puisse mesurer un courant d'intensité maximale 1A. (Réponse : 0,021Ω)

20) Lorsque un galvanomètre est traversé par un courant de 0,02A d'intensité, son index dévie jusqu'au bout du cadran. A ce moment la d.d.p. entre ses bornes est de 50V. Calculer la résistance du multiplicateur de potentiel nécessaire pour qu'il puisse mesurer une d.d.p. de 150V. (Réponse : 5000Ω)

21) Un voltmètre peut mesurer une d.d.p. de 150V lorsque son index dévie jusqu'au bout du cadran. Si la résistance de sa bobine est 50Ω et l'intensité du courant qui la traverse est $4 \times 10^{-4}$ A, calculer la résistance du multiplicateur de potentiel nécessaire. (Réponse : 374950Ω)

22) La résistance de la bobine d'un galvanomètre est 0,1Ω et sa limite de mesure est 5A. Calculer la résistance du diviseur de courant nécessaire pour augmenter de 10 fois sa limite de mesure. (Réponse : 0,0111Ω)

23) Un ampèremètre a une résistance de 30Ω. Calculer la résistance du shunt nécessaire pour diminuer au tiers sa sensibilité. Quelle est la résistance totale de l'appareil dans ce cas ? (Réponse : 15Ω, 10Ω)

24) Un galvanomètre de 54Ω de résistance relié à un shunt A, se laisse traversé par un courant égal à 0,01 du courant total. Relié à un shunt B, le courant qui le traverse est égal à 0,12 du courant total calculer la valeur de A et celle de B

(Réponse : 6Ω, 7,63Ω)

25) Un galvanomètre à cadre mobile a une résistance de 50Ω. Son index dévie jusqu'au bout du cadran lorsqu'il est traversé par un courant de 0,5A d'intensité. Expliquer comment l'utiliser pour mesurer :

a) Une d.d.p. maximale de 200V
(Réponse : une résistance de 350Ω reliée en série)

b) Une intensité maximale de 2A
(Réponse : une résistance de 16,6Ω reliée en parallèle)

26) Un milliampèremètre de 5Ω de résistance supporte un courant maximal de 15mA. Pour l'utiliser comme ohmmètre, on le relie à une pile de f.é.m. 1,5V et de résistance interne 1Ω. Calculer :

a- La résistance étalon nécessaire.

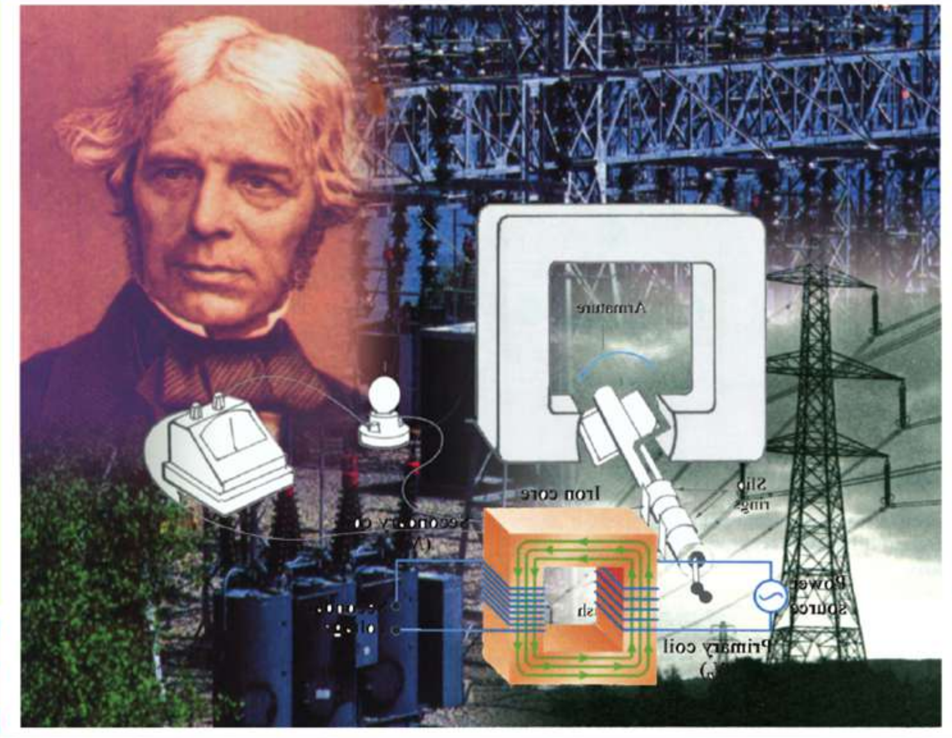
b- La résistance externe pour que son index indique 10mA.

c- L'intensité du courant qui le traverse si la résistance externe est 400Ω

(Réponse : 94Ω, 50Ω, 3mA)

# Electricité dynamique

Unité 1



## Chapitre 3 : Induction électromagnétique

# Chapitre 3

## Induction électromagnétique

### Introduction :

• La découverte faite par Oersted selon laquelle un courant électrique traversant un conducteur engendre un champ magnétique amena les physiciens à se demander s'il était possible qu'un champ magnétique engendre un courant

• Faraday répondit à cette question par la découverte de l'induction électromagnétique, qui est l'un des phénomènes importants en physique, sur lequel sont basés la construction et le fonctionnement des générateurs du courant très puissants et des transformateurs

### Expérience de Faraday :

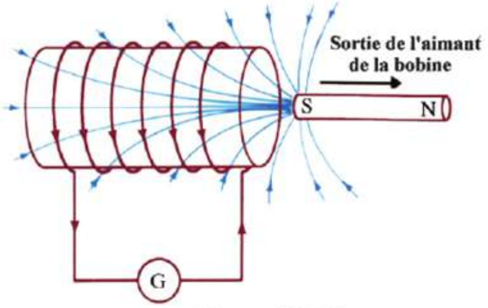



**Figure (11-1b)**
Sortie de l'aimant de la bobine

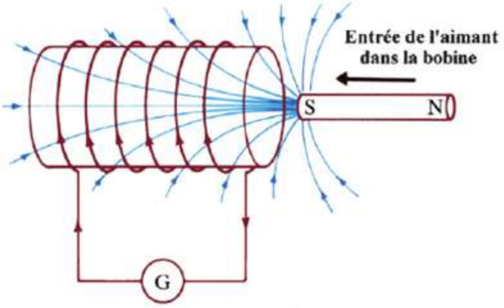



**Figure (11-1a)**
Entrée de l'aimant dans la bobine

• Faraday a fabriqué une bobine en forme de solénoïde, formée d'un fil de cuivre isolé, qu'il a reliée à un galvanomètre sensible dont le zéro est au milieu du cadran (figure 11-1).

• En introduisant un aimant à l'intérieur de la bobine, il constate que pendant ce mouvement, l'index du galvanomètre dévie dans un sens déterminé.

• En faisant sortir l'aimant de la bobine, il constate que pendant ce mouvement, l'index du galvanomètre dévie en sens contraire du sens précédent.

• Faraday appela **induction électromagnétique** le phénomène dans lequel sont engendrés une f.é.m. et un courant induit dans une bobine pendant le mouvement d'un aimant dans celle-ci de sorte que le sens de la réaction s'oppose à celui de l'action. Lorsqu'on approche l'aimant de la bobine, le sens du champ magnétique induit dans celle-ci s'oppose à son mouvement et le repousse. Si on éloigne l'aimant, le champ magnétique induit s'oppose à son mouvement et l'attire vers l'intérieur. Cette f.é.m. et ce courant induit sont produits lorsque le fil de la bobine coupe les lignes du flux magnétique de l'aimant en mouvement.

## Loi de Faraday :

Après plusieurs expériences, Faraday déduisit ce qui suit :

1. Le mouvement d'un conducteur dans un champ magnétique durant lequel varie le nombre de lignes de flux coupées avec le temps engendre dans ce conducteur une f.é.m. induite dont le sens dépend du sens de son mouvement

2. La f.é.m. induite $\varepsilon$ est proportionnelle au taux de variation du nombre de lignes de flux magnétique avec le temps.

$\varepsilon \propto \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ où $\varepsilon$ est la f.é.m. induite et $\Delta\phi$ est la variation du flux traversant les spires de la bobine pendant un temps $\Delta t$.

3. La f.é.m. induite est proportionnelle au nombre de spires de la bobine qui coupent les lignes du flux : $\varepsilon \propto N$

d'où $\varepsilon \propto N\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$

ou $\boxed{\varepsilon = -N\frac{\Delta\phi}{\Delta t}}$ (11-1) ***Loi de Faraday pour l'induction électromagnétique***

- Le signe (–) indique que le sens de la f.é.m. induite $\varepsilon$ qui est aussi celui du courant induit est opposé à celui de la variation du flux magnétique $\Delta\phi$ qui lui donne naissance et ceci d'après la loi de Lenz.

## Loi de Lenz :

Le sens du courant induit est tel qu'il s'oppose à la variation du flux magnétique qui lui donne naissance.

## Expérience permettant de vérifier la loi de Lenz :

Les figures (11-2) montrent une application directe de la loi de Lenz.

- La figure (a) montre que lorsqu'on approche le pôle Nord de l'aimant de la bobine, le sens du courant induit dans celle-ci est tel qu'il se forme à l'extrémité proche de l'aimant un pôle Nord qui :
  1. Repousse le pôle Nord de l'aimant et s'oppose à son mouvement
  2. S'oppose à l'augmentation du flux en créant un champ magnétique de sens contraire à celui de l'aimant

- La figure (c) montre que lorsqu'on éloigne le pôle Nord de l'aimant de la bobine, le sens du courant induit dans celle-ci est tel qu'il se forme à l'extrémité proche de l'aimant un pôle Sud qui :

1. Attire le pôle Nord de l'aimant et s'oppose à son mouvement
2. S'oppose à la diminution du flux en créant un champ magnétique de même sens que celui de l'aimant.

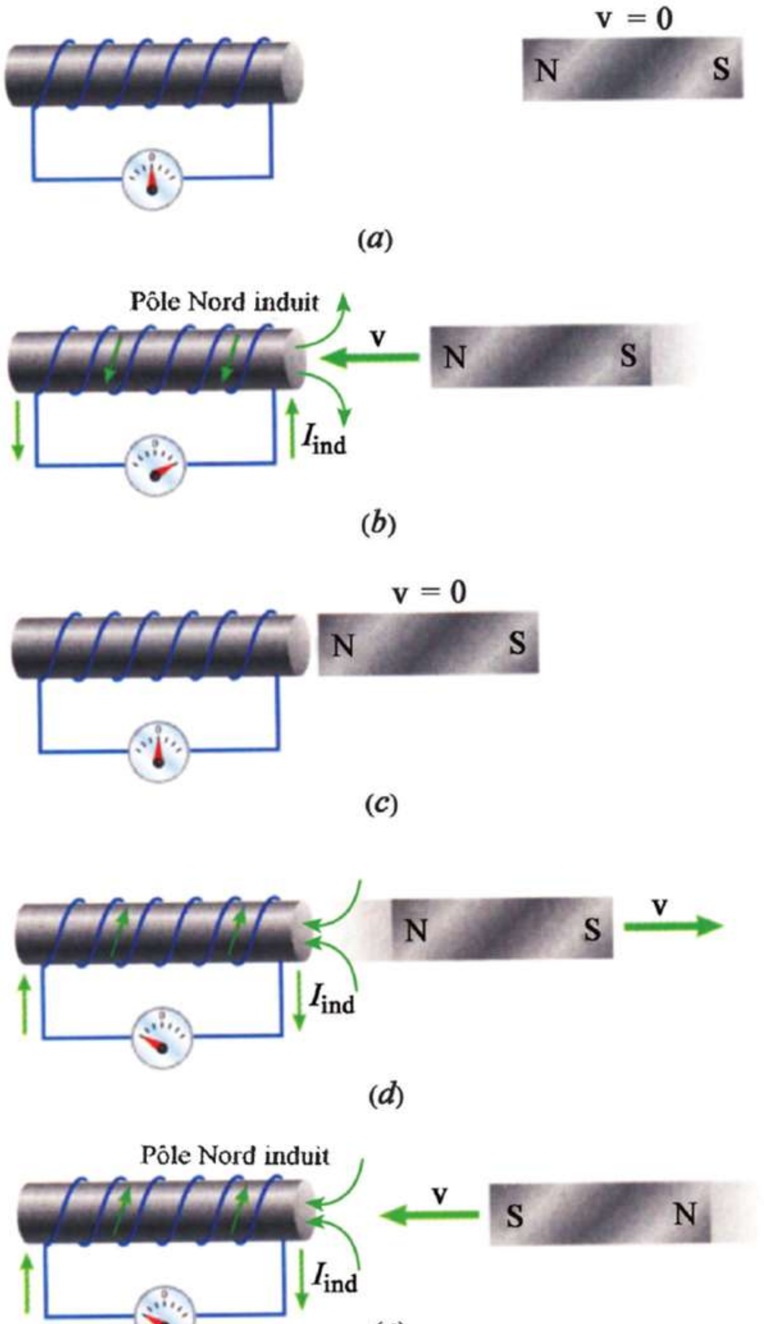



**Figure (11-2)**
Loi de Lenz

## Sens du courant induit dans un fil rectiligne :

• Dans l'une de ses nombreuses expériences, Faraday a démontré qu'il se produit un courant induit dans un fil rectiligne en mouvement perpendiculaire à un champ magnétique.

• Quelques années pl us tard, Fleming trouva une règle simple permettant de déterminer le sens du courant induit dans ce fil. C'est la règle de Fleming de la main droite.

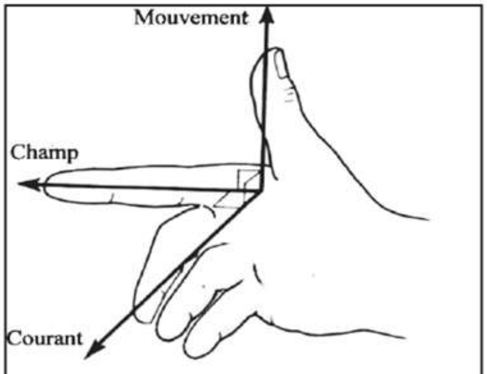



**Figure (11-3)**
Règle de Fleming de la main droite

• Plaçons le pouce, l'index et le majeur de la main droite dans trois directions perpendiculaires l'une à l'autre de telle sorte que le pouce pointe dans le sens du mouvement et l'index pointe dans le sens du champ, le majeur indique alors le sens du courant induit dans le fil.

## Induction mutuelle entre deux bobines :

• Si deux bobines sont placées l'une à l'intérieur de l'autre, ou l'une près de l'autr e, la variation de l'intensité du courant dans l'une bobine primaire engendre une f.é.m. induite dans l'autr, bobine secondaire.

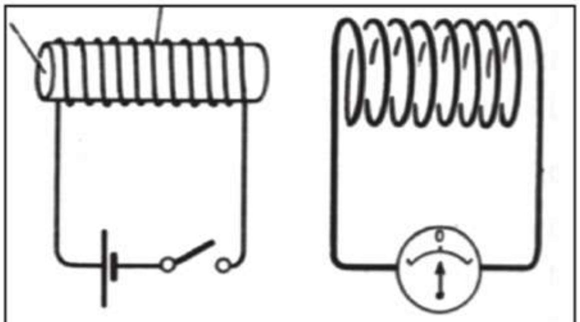


**Figure (11-4a)**
Si le courant ne passe pas dans le primaire, la f.é.m. induite dans le secondaire est nulle

• D'après la loi de Faraday, la f.é.m. induite $\varepsilon_2$ dans le secondaire est proportionnelle au taux de variation du flux magnétique qui lui-même est proportionnel au taux de variation de l'intensité du courant dans le primaire. Donc la f.é.m. induite $\varepsilon_2$ est proportionnelle au taux de variation $\Delta I_1/\Delta t$ de l'intensité du courant dans la bobine primaire.

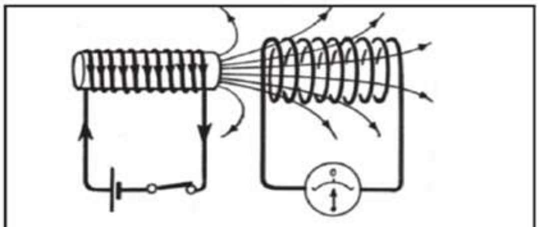


**Figure (11-4c)**
Lorsque le flux magnétique se stabilise, le courant du secondaire s'annule.

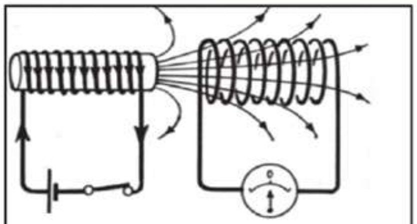


**Figure (11-4b)**
A l'instant où l'on ferme l'interrupteur du primaire, une f.é.m. est induite dans le secondaire.

Par suite $\varepsilon_2 \propto \dfrac{\Delta I_1}{\Delta t}$

et $\boxed{\varepsilon_2 = -M\dfrac{\Delta I_1}{\Delta t}}$ (11-2)

• Où M est le coefficient d'induction mutuelle entre les deux bobines. Son unité est $V.sA^{-1}$ qui équivaut à l'henry.

• Le signe (–) indique d'après la loi de Lenz, que le sens de la f.é.m. induite qui est aussi celui du courant induit est opposé à celui de la variation du flux magnétique qui lui donne naissance.

## Expérience pour étudier l'induction mutuelle entre deux bobines :

1. Formons un circuit que nous appellerons circuit primaire qui est constitué d'une bobine A reliée à une Pile par l'intermédiaire d'un interrupteur et d'un rhéostat.

2. Formons un autre circuit que nous appellerons circuit secondaire qui est constitué d'une bobine creuse B reliée à un galvanomètre sensible dont le zéro est au milieu du cadran.

3. Fermons l'interrupteur et introduisons A dans B ; le galvanomètre indique le passage d'un courant instantané en B dont le sens est contraire à celui de A.

4. Retirons A de B : nouveau courant instantané en B de même sens que celui de A.

5. Après avoir ouvert l'interrupteur, introduisons à nouveau A dans B puis

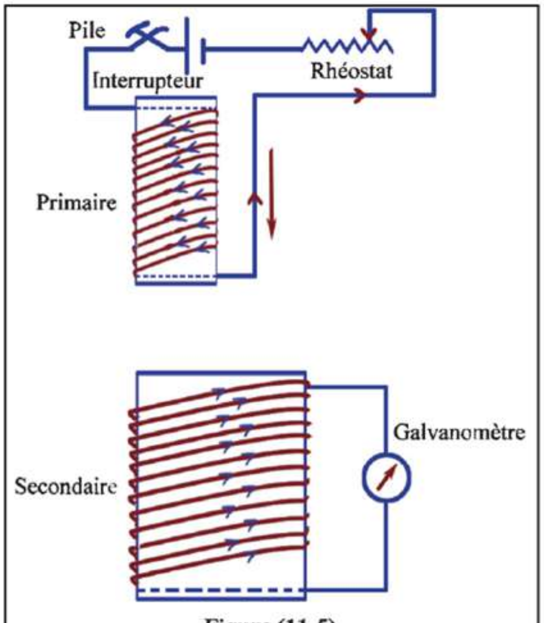



**Figure (11-5)**
Etude de l'induction mutuelle entre deux bobines

fermons l'interrupteur : le galvanomètre indique le passage d'un courant instantané en B dont le sens est contraire à celui de A

6. Ouvrons l'interrupteur : nouveau courant instantané en B dont le sens est le même que celui de A

7. Fermons l'interrupteur et à l'aide du rhéostat augmentons l'intensité du courant dans A : nouveau courant instantané en B dont le sens est contraire à celui de A.

8. A l'aide du rhéostat, diminuons l'intensité du courant dans A : nouveau courant instantané en B dont le sens est le même que celui de A.

**Conclusion :**

• Lorsqu'il y a une augmentation du flux magnétique à travers les spires du secondaire, le courant induit s'oppose à cette augmentation et il circule en sens contraire du courant du primaire.
Etapes (1), (3) et (5)

• Réciproquement, lorsqu'il y a diminution du flux magnétique à travers les spires du secondaire, le courant induit s'oppose à cette diminution et il circule dans le même sens que le courant du primaire.
Etapes (2), (4) et (6)

• Ces résultats sont en accord avec la loi de Lenz.
Dans tous les cas, le courant induit dans le circuit secondaire s'oppose à la variation du flux magnétique qui lui donne naissance.

• Le coefficient d'induction mutuelle entre deux bobines dépend de :
  1- La présence d'un no yau de fer à l'intérieur des bobines.
  2- Le volume de chaque bobine et leur nombre de spires.
  3- La distance qui les sépare.

• Le transformateur électrique est une application de l'induction mutuelle

## Self induction d'une bobine :

**Expérience :**

• Relions le circuit indiqué sur la figure dans lequel la bobine d'un électro-aimant très puissant (grand nombre de spires) est reliée en série à une pile de 6V et à un interrupteur.

• Lorsque le courant traverse la bobine, il se produit un champ magnétique intense. Chaque spire agit comme un petit aimant dont les lignes de flux coupent les spires voisines

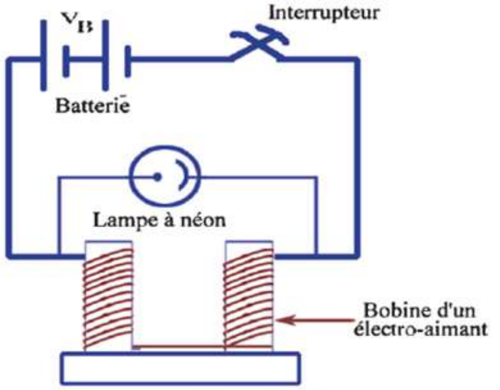


**Figure (11-6)**
L'effet de la self-induction d'une bobine

• Lorsqu'on ouvre l'interrupteur, une étincelle traverse les deux bornes de celui-ci. Cette étincelle s'explique de la manière suivante :

• A l'instant où l'on coupe le courant dans le circuit de la bobine, le champ magnétique de chaque spire s'annule.

• Le taux de diminution du nombre de lignes de flux coupant chaque spire engendre dans chacune d'elle une f.é.m. induite.

• Les spires étant reliées en série, les f.é.m. s'ajoutent et la f.é.m. totale résultante, due à la self-induction de la bobine, engendre un courant induit qui, d'après la loi de Lenz, doit avoir le même sens que le courant initial

• Ainsi, quand on coupe le courant du circuit de la bobine, la self-induction de celle-ci engendre un courant de même sens dont les charges s'écoulent sous forme d'une étincelle entre les bornes de l'interrupteur

• Si la bobine est formée d'un grand nombre de spires la f.é.m. induite pendant la rupture du courant est beaucoup plus grande que celle de la batterie de 6V. Cette grande f.é.m. induite est alors capable de provoquer la fluorescence d'un tube à néon relié en parallèle à la bobine. (La d.d.p. nécessaire pour provoquer cette fluorescence est d'environ 180 volts).

**Formule :**

• Etant donné que la f.é.m. induite est proportionnelle au taux de variation du flux, et étant donné que le taux de variation du flux est proportionnel au taux de variation de l'intensité du courant traversant la bobine ; la f.é.m. induite engendrée par la self-induction est donc proportionnelle au taux de variation de l'intensité du courant.

$$\varepsilon \propto \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad \text{et} \quad \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \propto \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Ainsi, $\varepsilon \propto \frac{\Delta I}{\Delta t}$ ou $\boxed{\varepsilon = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}}$ (11-3)

- La constante L de proportionnalité est appelée "coefficient de self-induction" ou plus simplement " self-induction " de la bobine

- Le signe (–) indique que la f.é.m. induite est opposée à la variation qui lui donne naissance (loi de Lenz)

## Définition du coefficient de self-induction d'une bobine:

$$\boxed{L = \frac{-\varepsilon}{\Delta I/\Delta t}}$$

La self-induction d'une bobine est mesurée par la f.é.m. induite entre ses bornes quand l'intensité du courant qui la traverse varie au taux d'un ampère par seconde.

L'unité de mesure du coefficient de self-induction d'une bobine est l'henry.

## Définition d'un henry (1 H)

C'est la self-induction d'une bobine dans laquelle est engendrée une f.é.m. induite de 1 volt lorsque l'intensité du courant qui la traverse varie au taux de 1 ampère par seconde.

Ainsi

$$1 \text{ henry} = 1 \ \frac{\text{volt.seconde}}{\text{ampère}}$$

La self-induction L d'u ne bobine dépend

1- de sa forme géométrique (ses dimensions)
2- du nombre de spires
3- de la distance qui les sépare
4- de la perméabilité magnétique de son noyau

Henry

## Applications :

- On utilise la self-induction pour l'éclairage des lampes fluorescentes. L'énergie magnétique mise en réserve dans une bobine est déchargée dans un tube vide d'air contenant un gaz inerte. Les atomes de celui-ci se heurtent et s'ionisent. Le choc des ions avec la matière fluorescente se trouvant sur la paroi interne du tube produit l'émission de lumière visible.

- La self-induction est utilisée dans la bobine de Ruhmkorff qui produit une étincelle intermittente employée dans le système d'allumage des moteurs à combustion interne (comme celui des voitures)

## Courants de Foucault :

• Si l'on varie le nombre de lignes de flux magnétique traversant une pièce métallique, cela engendre dans celle-ci des courants induits appelés courants de Foucault.

• Cette variation du nombre de lignes de flux coupées peut se faire, soit en déplaçant la pièce métallique dans un champ magnétique, soit en l'exposant à un champ magnétique variable engendré par un courant alternatif

• On utilise la chaleur dégagée par les courants de Foucault pour fondre les métaux dans les fours à induction.

## Valeur de la f.é.m. induite dans un fil rectiligne en mouvement :

La figure (11-7) montre un fil rectiligne de longueur $\ell$ qui glisse à une vitesse constante v sur un conducteur en forme d'U placé perpendiculairement à un champ magnétique dont la densité de flux est B.

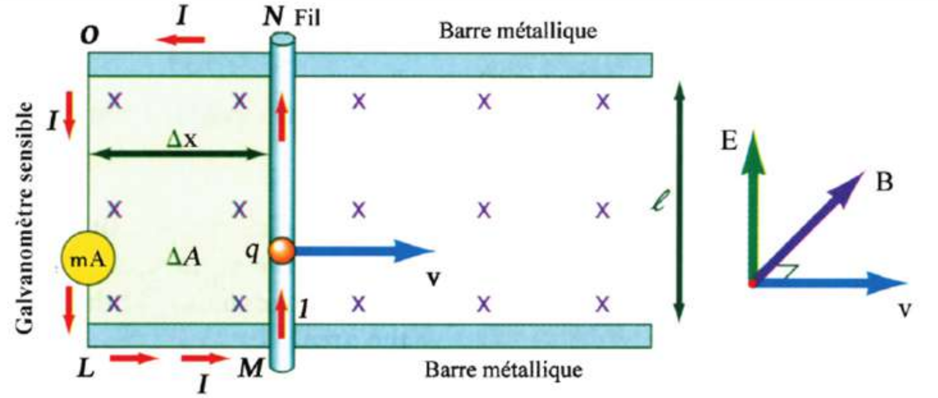



**Figure (11-7)**
F.é.m. induite engendrée dans un fil rectiligne

Si le fil subit un déplacement $\Delta x$ vers la droite en un temps $\Delta t$, l'aire décrite par le fil est

$\Delta A = \ell . \Delta x$

$\phi = BA \cos 0° = BA \Rightarrow$ La variation du flux $\Delta \phi = B. \Delta A = B.\ell.\Delta x$

La f.é.m. induite est $\varepsilon = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -B\frac{\Delta x}{\Delta t}\ell$ ou $\mathcal{E} = -B v \ell$

La valeur absolue de la f.é.m. induite dans le fil est

$$\mathcal{E} = B\, v\, \ell \qquad (11\text{-}5)$$

(volt) (T) (m/s) (m)

• Si la vitesse v n'est pas perpendiculairement au champ B et que θ est l'angle compris entre le sens de la vitesse et celui du champ, la formule devient:

$\mathcal{E} = B v \ell \sin\theta$ (11-6)

**Remarque :**

$\varepsilon = 0$ si $\theta = 0°$ ou $\theta = 180°$, c.à.d. si le fil se déplace parallèlement au champ magnétique.

## Dynamo à courant alternatif (générateur du C.A.)

• C'est un appareil qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique quand sa bobine tourne dans un champ magnétique.

• Le courant induit qui en résulte peut être transporté sur de longues distances par l'intermédiaire de câbles appropriés.

**Description :**

• Une dynamo simple se compose de trois parties essentielles :

1. Un aimant produisant le champ magnétique : Cet aimant est un aimant permanent ou un électro-aimant

2. Un élément générateur de courant : qui est une bo bine rectangulaire en cuivre, formée d'une seule spire qui tourne entre les deux pôles de l'aimant

3. Deux anneaux sur lesquels glissent deux balais :

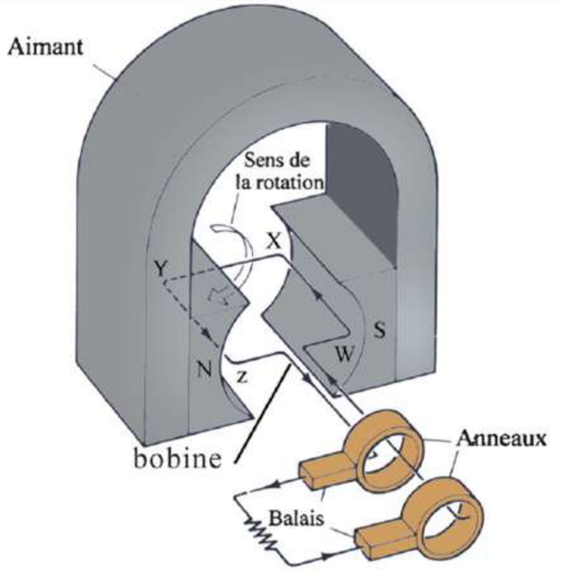



**Figure (11-8)**
Schéma simplifié d'un générateur de C.A.

Les deux anneaux sont reliés aux deux extrémités de la bobine et tournent avec elle dans le champ magnétique. Les deux balais en graphite sont fixes, et ils sont en contact chacun avec l'un des anneaux. Ils transmettent le courant induit dans la bobine au circuit extérieur.

• On fournit au générateur de courant (ou bobine) l'énergie mécanique : nécessaire pour la faire tourner dans le champ magnétique.

• L'énergie électrique résultante est sous forme d'un courant alternatif d'intensité et de sens variable.

• Pour comprendre le fonctionnement de la dynamo à courant alternatif, nous allons étudier ce qui se produit dans sa bobine pendant une rotation complète.

**Formules :**

- A chaque instant, la f.é.m. induite dans chacun des côtés de la bobine parallèle à son axe de rotation, est :

$$\mathcal{E} = B\, v\, \ell \sin\theta$$

- Il ne se produit aucune f.é.m. induite dans les deux autres côtés de la bobine.

- Or, pour une bobine qui décrit un cercle de rayon r, la vitesse v à cet i nstant est v = ω r ; ω étant sa vitesse angulaire, Remplaçons v par sa valeur, on obtient:

$$\mathcal{E} = B\, \omega\, r\, \ell \sin\theta$$

- La f.é.m. induite dans l'autre côté de cette bobine étant identique à cette valeur, la f.é.m. induite totale est donc :

$$\mathcal{E} = 2\, B\, \omega\, r\, \ell \sin\theta = B\,(2r\ell)\,\omega \sin\theta$$

- Or, l'aire de la bobine est $A = 2r\ell$

donc $\mathcal{E} = BA\, \omega \sin\theta$

- Si la bobine est formée de N spires, la f.é.m. induite instantanée est

$$\boxed{\mathcal{E} = N\, BA\, \omega \sin\theta} \qquad (11\text{-}8)$$

- Pour une dynamo déterminée, tournant à une vitesse déterminée, NBAω est une constante. Par suite $\mathcal{E}$ varie avec sin θ

- A un instant donné, θ est l'angle de rotation de la bobine à partir de la position de départ. C'est aussi l'angle compris entre la normale à la bobine et le sens du champ magnétique à cet instant (θ est aussi l'angle entre le sens de la vitesse et le sens du champ).

- Ainsi, $\mathcal{E} = 0$ quand $\theta = 0°$ et $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{max}$ quand $\theta = 90°$ car $\sin 90° = 1$

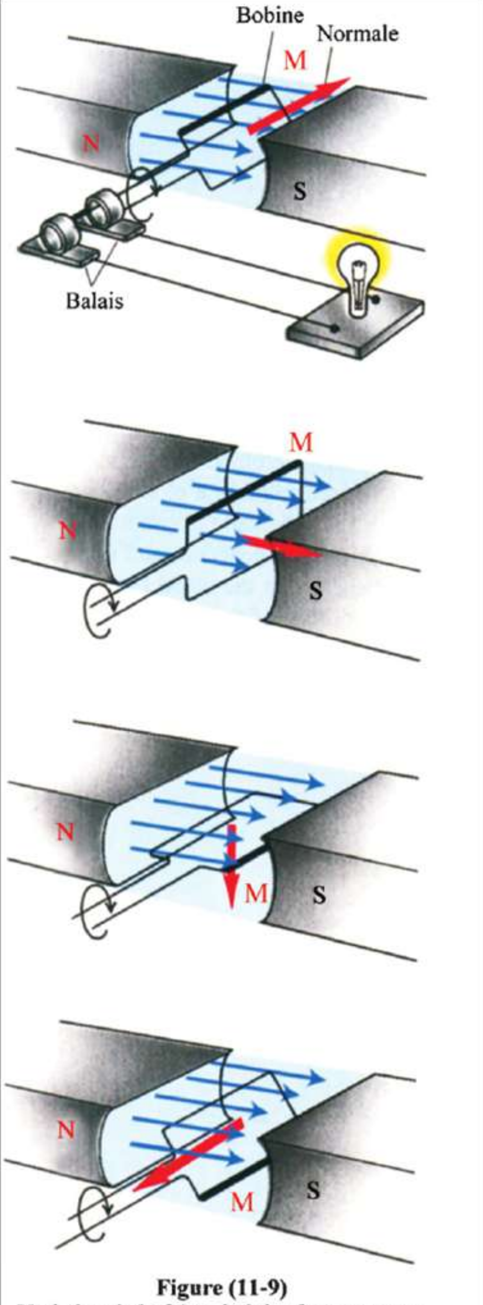


**Figure (11-9)**
Variation de la f.é.m. induite durant un tour complet

Donc $$\boxed{\mathcal{E}_{max} = N.B.A\, \omega = N.B.A\,(2\,\pi\, \nu)} \qquad (11\text{-}8)$$

- On peut donc déterminer la f.é.m. induite instantanée en fonction de $\mathcal{E}_{max}$ par la formule :

$$\boxed{\text{f.é.m.} = \mathcal{E}_{max} \sin\theta} \qquad (11\text{-}9)$$

• Après un temps t, $\theta = \omega t = 2\pi\nu t$ ; $\nu$ étant la fréquence de la bobine, c.à.d. le nombre de tours qu'elle fait par seconde.

Donc $\boxed{\mathcal{E} = \mathcal{E}_{max} \sin(2\pi\nu t)}$ (11-10)

• Ainsi, la f.é.m. induite varie sinusoïdalement avec le temps comme l'indique la figure (11-9)

## Variation du courant induit pendant une rotation complète de la bobine :

• Durant une oscillation complète, l'intensité du courant augment e de zéro à un maximum puis diminue à zéro pendant ½ période.

• Il change ensuite de sens et son intensité augmente de zéro à un maximum puis diminue à zéro pendant l'autre ½ période.

• Ceci est une oscillation complète de courant qui équivaut à un tour complet de la bobine qui l'engendre.

• La fréquence $\nu$ du courant est le nombre d'oscillations effectuées par seconde. La fréquence du C,A dans nos maisons est de 50 oscillations/seconde.

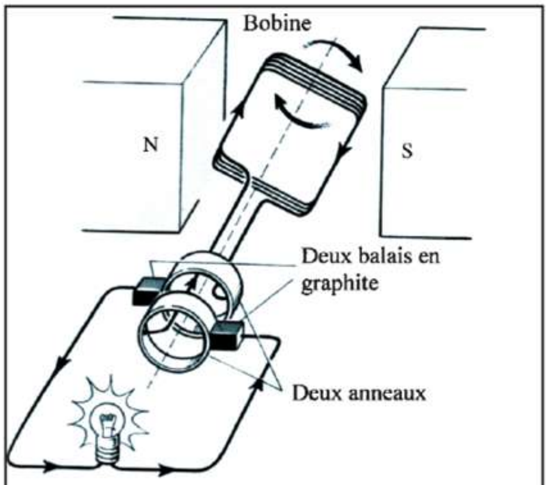



**Figure (11-10a)**
Générateur du C.A.

## Exemple :

***La bobine d'un générateur simple de C,A est formée de 100 spires, l'aire de section de chacune est de 0,21 m$^2$. Si la bobine tourne avec une fréquence de 50 tours/seconde dans un champ magnétique constant de densité 10$^{-3}$ Wb/m$^2$, calculer la f.é.m. induite maximale ainsi que la f.é.m. induite lorsque l'angle compris entre le sens de la vitesse et celui du champ = 30°***

**Solution**

$\mathcal{E}_{max} = NBA\omega = NBA\,(2\pi\nu)$

$= 100 \times 10^{-3} \times 0{,}21 \times 2 \times \frac{22}{7} \times 50 = 6{,}6 \text{ V}$

$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{max} \sin\theta = 6{,}6 \sin 30° = 3{,}3 \text{ V}$

**Remarque :**

• L'intensité du courant induit étant proportionnelle à la f.é.m. induite, l'intensité instantanée d'un C,A est donc :

$$I = I_{max} \sin\omega t = I_{max} \sin(2\pi\nu t)$$

• Ainsi, l'intensité est maximale quand la f.é.m. induite est maximale et l'intensité s'annule quand la f.é.m. induite s'annule

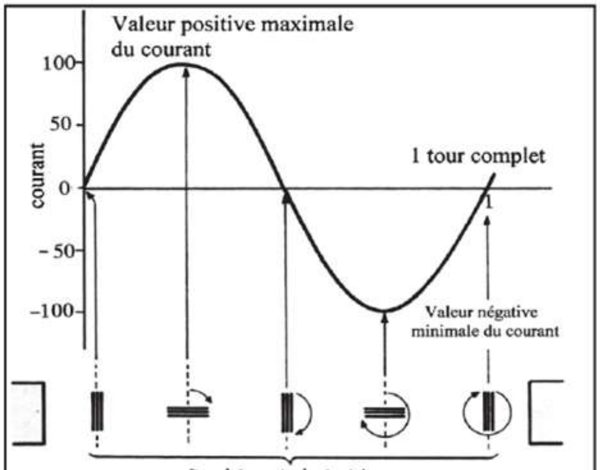


**Figure (11-10b)**
Courbe sinusoïdale montrant comment varie l'intensité avec l'angle de rotation

## Valeur efficace du courant alternatif :

• Pendant une période, la valeur moyenne de l'intensité d'un courant alternatif est nulle, car elle varie entre ($I_{max}$) et ($-I_{max}$). Cependant, il y a consommation d'énergie électrique sous forme de chaleur à cause du mouvement des charges électriques. Ce taux de consommation d'énergie ou puissance électrique ($P = I^2R$) est proportionnel au carré de l'intensité du courant.

• Puisque les courants alternatif et continu dégagent de la chaleur lors de leur passage à travers un conducteur, nous allons définir et mesurer l'intensité efficace d'un courant alternatif de la manière suivante :

• L'intensité efficace d'un courant alternatif est l'intensité d'un courant continu qui, en traversant le même conducteur pendant le même temps, engendre la même énergie thermique ou la même puissance que celle du courant alternatif.

• L'intensité efficace d'un courant alternatif est notée $I_{eff}$ et sa valeur en fonction de $I_{max}$ est :

$$I_{eff} = \frac{\sqrt{2}}{2} I_{max} = 0{,}707 I_{max} \qquad (11\text{-}11)$$

De même, pour une force électromotrice alternative, sa valeur est :

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\sqrt{2}}{2} \varepsilon_{max} = 0{,}707\ \varepsilon_{max} \qquad (11\text{-}12)$$

## Exemple :

***Si l'intensité efficace d'un C.A est 10A et la d.d.p. efficace est 240V, quelle est la valeur maximale de l'intensité et celle de la d.d.p. ?***

**Solution :**

$I_{eff} = 0,707\ I_{max}$

$10 = 0,707\ I_{max}$

d'où

$$I_{max} = \frac{10}{0,707} = 14,14A$$

$V_{eff} = 0,707\ V_{max}$

$240 = 0,707\ V_{max}$

d'où

$$V_{max} = \frac{240}{0,707} = 339,5V$$

## Redressement du courant alternatif dans une dynamo :

• Certaines opérations électriques comme l'électrolyse (utilisée pour la préparation de certains métaux) nécessite l'emploi d'un courant électrique qui ne change pas de sens. Ce courant de sens unifié est appelé "courant redressé"

• On peut obtenir d'une dynamo un courant redressé en remplaçant les deux anneaux par un commutateur formé d'un cylindre métallique creux fendu en deux moitiés (1) et (2) qui sont isolées l'une de l'autr e. Les deux fentes du cylindre sont dans un plan perpendiculaire à celui de la bobine. Ce cylindre est appelé redresseur de courant.

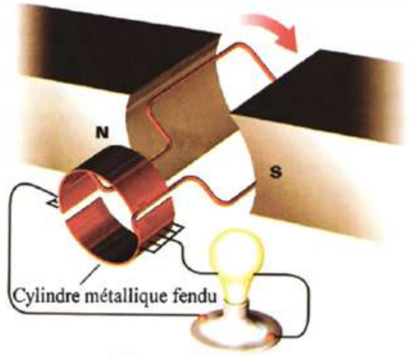



**Figure (11-11b)**
Générateur de courant redressé

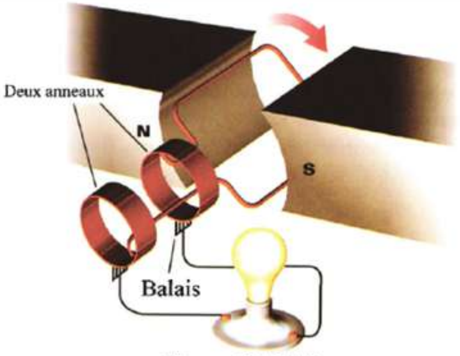



**Figure (11-11a)**
Générateur de C.A.

• Contre le cylindre, frottent deux balais fixes $F_1$ et $F_2$ qui sont reliés au circuit extérieur R. Ces balais sont en contact avec les fentes lorsque le plan de la bobine est perpendiculaire aux lignes du flux ma gnétique c.à.d. à l'instant où la f.é.m. induite dans la bobine = zéro

• Etudions les sens du courant induit pendant une rotation complète de la bobine.

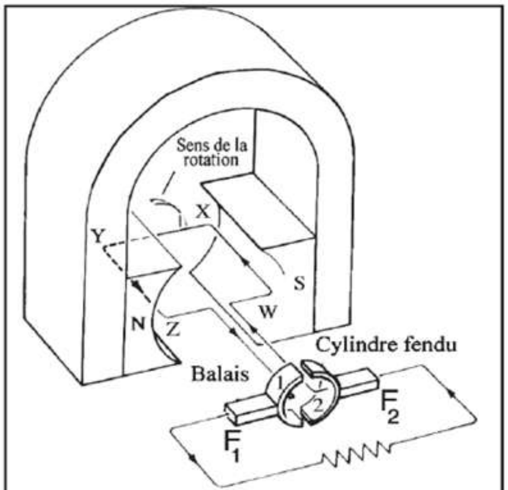


**Figure (11-11c)**
Le cylindre métallique fendu redresse le courant

Pendant le premier demi-tour
(de 0° à 180°)
$F_1$ est en contact avec (1) et $F_2$ avec (2). Le courant circule dans la bobine dans le sens wxyz et il circule dans le circuit extérieur de $F_1$ vers $F_2$

Pendant le deuxième demi-tour
(de 180° à 360°)
$F_1$ est en contact avec (2) et $F_2$ avec (1). Le courant circule dans la bobine dans le sens zyxw et il circule dans le circuit extérieur de $F_1$ vers $F_2$. Ainsi $F_1$ est toujours le pôle positif et $F_2$ le pôle négatif. La courbe de la figure montre comment varie la f.é.m. (ou l'intensité du courant) avec l'angle de rotation de la bobine.

• Cette f.é.m. passe de la valeur zéro à la valeur maximum puis à la valeur zéro à chaque demi-tour.

• Pour obtenir un courant dont l'intensité et le sens ne changent pas, on utilise plusieurs bobines formant entre elles des angl es égaux. Le nombre de sections du cylindr e est le double du nombre de bobines. On obtient ainsi un courant de sens unique dont l'intensité est presque constante (figure 11-12).

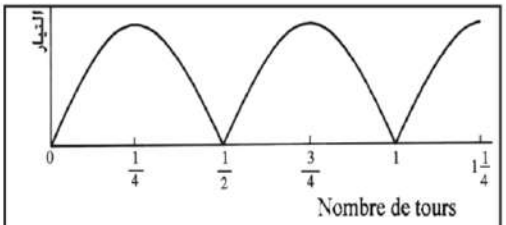


**Figure (11-11d)**
Courbe sinusoïdale redressée de l'intensité avec le nombre de tours

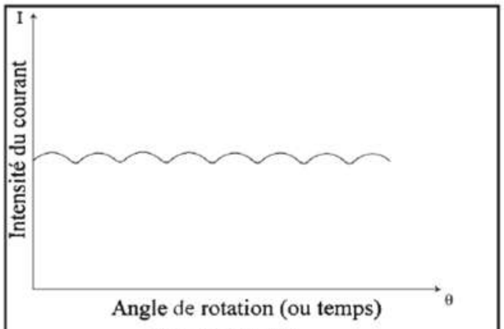


**Figure (11-12)**
Courant à peu près continu

## Transformateur électrique :

• Son principe de fonctionnement est basé sur l'induction mutuelle entre deux bobines. Il est utilisé pour élev er ou abaisser la tension (la d.d.p.).

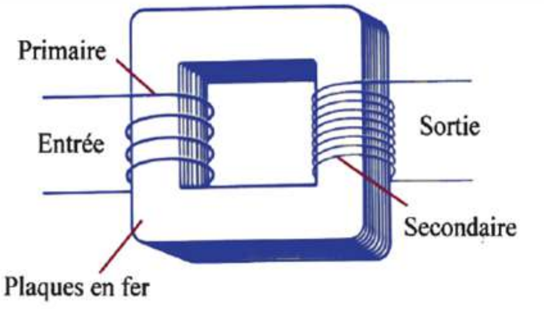



**Figure (11-13a)**
Transformateur électrique

• Les transformateurs qui se trouvent dans les stations génératrices sont éleveurs de tension alors que ceux qui se trouvent dans les lieux de distribution sont des abaisseurs de tension.

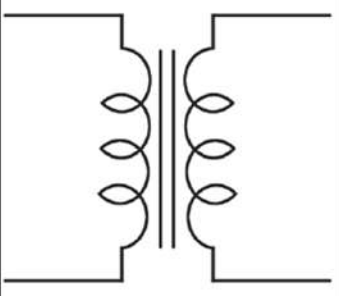


**Figure (11-13b)**
Symbole du transformateur

• Un transformateur comporte (figure 10-13)

1. Un noyau en fer constitué p ar des plaques minces isolées les unes des autres pour diminuer les courants de Foucault et par suite diminuer l'énergie électrique perdue.

2. Une bobine primaire enroulée autour du noyau, qui comporte un nombre $N_p$ de spires.

3. Une bobine secondaire enroulée autour du noyau, qui comporte un nombre Ns de spires.

## Principe du fonctionnement :

• Relions les bornes du primaire à une source de courant alternatif de f.é.m. $V_p$ : il résulte dans cette bobine un courant alternatif de valeur $I_p$ qui engendre un champ magnétique variable de même fréquence que la source.

• Les lignes de flux de ce champ variable sont concentrées dans le noyau en fer (car elles y trouvent moins de résistance que dans l'air), elles traversent les spires du secondaire et induisent dans celui-ci une f.é.m. alternative Vs, il résulte dans le circuit du secondaire, un courant alternatif $I_s$ ayant la même fréquence que $I_p$.

## Relation entre les f.é.m. $V_p$ et $V_s$ :

• A n'importe quel instant le flux magnétique traversant l'une des spires du primaire est égal au flux magnétique traversant l'une des spires du secondaire (s'il n' y a pas de pertes de lignes de flux).

• Si Np est le nombre de spires du primaire, Ns celui du secondaire et $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ le taux de variation du flux à travers une spire du primaire ou du secondaire; on a d'après la formule

$$\varepsilon = -N\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad ; \quad V_s = -N_s\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \text{ ---(1)} \quad \text{et} \quad V_p = -N_p\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \text{ ---(2)}$$

Divisions (1) par (2) on a : $\boxed{\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}}$ (11-13)

ainsi le voltage est proportionnel au nombre de spires.

• Si $N_s > N_p$ alors $V_s > V_p$, le transformateur est un éleveur de tension

• Si $N_s < N_p$ alors $V_s < V_p$, le transformateur est un abaisseur de tension

• Si, par exemple, $N_s = 2\ N_p$, on a $V_s = 2\ V_p$

## Relation entre les intensités $I_p$ et $I_s$ :

• En supposant qu'il n' y a pas de pertes d'énergie dans un transformateur, c.à.d. que toute l'énergie électrique du primaire se transmet intégralement au secondaire et ceci d'après la loi de conservation d'énergie :

On a : $V_p.I_p.t = V_s.I_s.t$

Ou $V_p.I_p = V_s.I_s$ (puissance à l'entrée est égale à celle de la sortie)

$\therefore \boxed{\frac{V_s}{V_p} = \frac{I_p}{I_s}}$ (11-14)

mais $\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \therefore \boxed{\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p}}$

Ainsi l'intensité du courant est inversement proportionnelle au nombre de spires.

• La relation précédente montre pourquoi dans les stations génératrices, on utilise des transformateurs éleveur de tension. En élevant la tension à une très grande valeur, l'intensité du courant diminue ce qui diminue la perte de puissance $I^2.R$ dans les câbles (où I est l'intensité du courant traversant les câbles de résistance R)

• Si par exemple on réduit I à $\frac{1}{100}$ de sa valeur, la réduction dans la puissance perdue sera $\frac{1}{10000}$ de sa valeur.

• Au lieu d'utilisation, on utilise un transformateur abaisseur pour ramener la tension à 220 volt qui est la d.d.p. nécessaire pour faire fonctionner la plupart des appareils électriques utilisés dans les maisons.

## Usages du transformateur électrique :

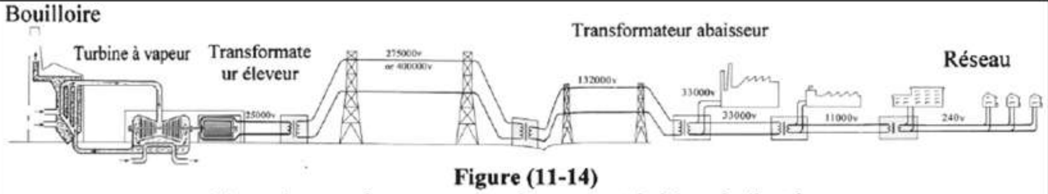



**Figure (11-14)**
Usage des transformateurs pour le transport de l'énergie électrique

• Cet appareil est utilisé pour le transport de l'énergie électrique du lieu de production jusqu'au lieu d'utilisation sur de grandes distances, à travers des câbles métalliques. Ce transport se fait presque sans perte d'énergie. On utilise des transformateurs éleveurs de tension aux lieux de production et des transformateurs abaisseurs aux lieux de distribution

• Il est utilisé pour alimenter certains appareils électriques comme les sonneries, les réfrigérateurs et d'autres.

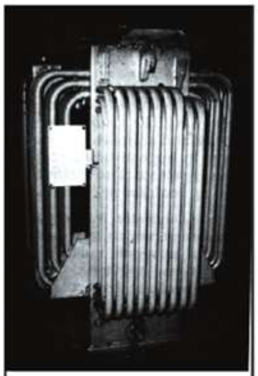


**Figure (11-15)**
Transformateur géant utilisé dans le transport de l'énergie électrique

## Rendement d'un transformateur :

• Le rendement d'un transformateur est le rapport de l'énergie électrique reçue dans le secondaire à celle donnée au primaire pendant le même temps.

$$\eta = \frac{V_s I_s}{V_p I_p} \times 100 \qquad (11\text{-}16)$$

• Le rendement du transformateur est de 100 % s'il n' y a pas de perte d'énergie électrique, c.à.d. que l'énergie électrique du primaire se transmet intégralement au secondaire, mais ce transformateur n'existe pas pratiquement car il y a toujours une perte d'énergie due aux causes suivantes :

1. Une partie de l'énergie électrique se transforme en chaleur dans les fils des deux bobines. Pour la réduire, on emploie des fils métalliques de très petites résistances.

2. Une partie de l'énergie électrique se transforme en chaleur dans le noyau à cause des courants de Foucault. Pour la réduire, on fabrique le noyau avec des plaques minces et isolées de fer doux au silicium à cause de leur grande résistivité.

3. Une partie de l'énergie électrique se transforme en énergie mécanique utilisée pour orienter les molécules magnétiques du noyau. Le noyau en fer doux au silicium diminue cette perte car ses molécules magnétiques s'orientent facilement.

• Si par exemple $\eta = 90$ %, l'énergie perdue représente le 10 % de l'énergie électrique du primaire.

## Enrichissons nos connaissances :

### Applications de l'induction électromagnétique

• L'induction électromagnétique est utilisée dans le magnétophone où les signaux électriques sont transformés en champ magnétique variable qui aimante un ruban passant devant la tête d'enregistrement.
• Durant le fonctionnement, la t ête de lecture transforme ce qui a été enregistré sur le ruban en signaux électriques.
• La même opération se produit dans les disques durs des ordinateurs où les informations sont enregistrées par une aimantation permanente (figure 11-16).
• C'est pourquoi ces informations ne disparaissent pas lorsqu'on coupe le courant.

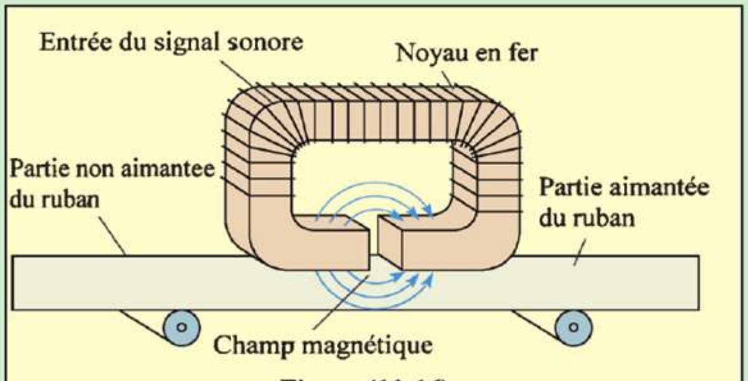



**Figure (11-16)**
Utilisation de l'induction électromagnétique pour enregistrer un son

## Exemples :

***1. Un transformateur fonctionne avec une source de f.é.m. 240V et donne un courant de 4A d'intensité avec une f.é.m. de 900V. Quelle est l'intensité du courant de la source si le rendement du transformateur est 100 % ?***

**Solution :**

$$\because \frac{V_s}{V_p} = \frac{I_p}{I_s} \Rightarrow \frac{900}{240} = \frac{I_p}{4}$$

$$\therefore Ip = \frac{900 \times 4}{240} = 15A$$

***2. Une sonnerie électrique utilise un transformateur dont le rendement est 80 % et qui donne 8V. Si le nombre de spires du primaire est 1100, sa tension est 220V et l'intensité du courant qui le traverse est 0,1A; Calculer le nombre de spires du secondaire et l'intensité du courant qui le traverse.***

**Solution :**

$$\eta = \frac{V_s I_s}{V_p I_p} \times 100$$

$$\eta = \frac{V_s}{V_p} \times \frac{N_p}{N_s} \times 100$$

$$80 = \frac{8}{220} \times \frac{1100}{N_s} \times 100 \quad \text{d'où} \quad Ns = 50 \text{ spires}$$

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s} \Rightarrow \frac{I_s}{0,1} = \frac{1100}{50} \Rightarrow I_s = 2,2\,A$$

### Enrichissons nos connaissances :

- Il existe deux genres de courant et par suite de d.d.p. ; le courant continu (C,C) et le courant alternatif (C,A).
- L'intensité du courant continu dépend de la résistance seulement alors que celle du courant alternatif dépend de la résistance, de la self induction d'une bobine et de la présence d'un condensateur.
- Le courant qui circule dans nos maisons est alternatif, sa d.d.p. est 220V et sa fréquence est 50 Hz.
- Il est souvent utile d'abaisser ce voltage et de transformer le C.A. en C,C pour charger la batterie du portable et pour l'alimentation de plusieurs appareils électroniques. Ces deux opérations sont effectuées par un transformateur et un circuit simple pour le redressement.

## Le moteur électrique

C'est un appareil qui transforme de l'énergie électrique en énergie mécanique. Il effectue donc la transformation inverse de celle qui se produit dans une dynamo.

**Description :**

- Le moteur comprend comme la dynamo à redresseur une bobine rectangulaire ABCD formée d'un grand nombre de spires de fil de cuivre isolé, enroulées autour d'un noyau cylindrique en fer doux (figure 11-17).

- Ce noyau est constitué de plusieurs disques métalliques minces isolés les uns des autres pour diminuer les courants de Foucault.

- Les extrémités du fil de cuivre sont reliées à un cylindre métallique fendu en deux moitiés x et y (commutateur) isolées l'une de l'autre. Les d eux fentes sont dans un plan perpendiculaire à celui de la bobine.

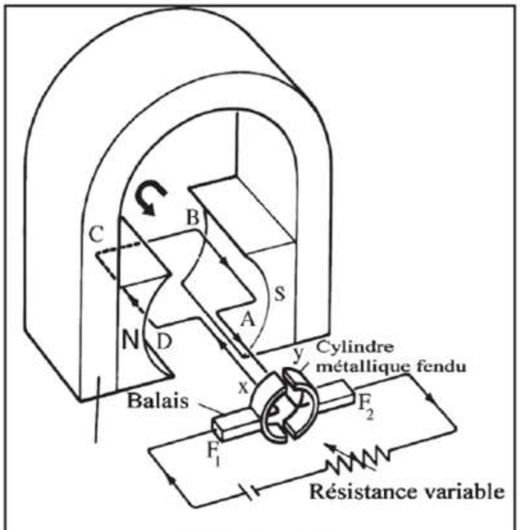



**Figure (11-17)**
Fonctionnement du moteur électrique

- Contre le cylindre frottent deux balais $F_1$ et $F_2$ qui sont reliés aux pôles d'une batterie.

- La bobine et le cylindre tournent autour d'un même axe de rotation entre les deux pôles d'un aimant en fer à cheval.

- La droite joignant les balais $F_1$ et $F_2$ est parallèle aux lignes de flux de l'aimant.

**Principe du fonctionnement :**

- Le principe du moteur électrique est le même que celui du galvanomètre à cadre mobile sauf que la bobine du moteur doit continuellement tourner dans le même sens.

- Les deux demi-cylindres x et y échangent leurs positions avec les balais $F_1$ et $F_2$ à chaque demi-tour. Il en résulte que le courant change de sens dans la bobine à chaque demi-tour.

- Sur la figure la bobine est parallèle au champ, le balai $F_1$ est en contact avec x et $F_2$ avec y, le courant traverse la bobine dans le sens DCBA

- Le côté AB est parcouru par un courant perpendiculaire à un champ magnétique, il est donc soumis à une force magnétique qui tend à le déplacer vers le haut. (Appliquer la règle des trois doigts de la main gauche de Fleming). Le côté CD est soumis à une force qui tend à le déplacer vers le bas.

• Ces deux forces forment un couple qui fait tourner la bobine (dans le sens indiqué par la flèche) et lui donne ainsi de l'énergie cinétique.

• Pendant cette rotation le bras du couple ainsi que le moment du couple agissant sur la bobine diminuent graduellement jusqu'à s'annuler lorsque la bobine est perpendiculaire au champ. A ce moment les balais sont en contact avec les fentes isolantes et le courant ne circule pas dans la bobine. Mais celle-ci emportée par son énergie cinétique (ou son inertie), dépasse cette position et poursuit sa rotation.

• A ce moment $F_1$ est en contact avec y et $F_2$ avec x, le courant traverse la bobine dans le sens ABCD qui est l'inverse du sens précédent.

• En appliquant la règle de Fleming : on constate que les forces agissant sur AB et CD forment un couple qui fait tourner la bobine toujours dans le même sens.

• Pendant cette rotation, le bras du couple ainsi que le moment du couple agissant sur la bobine diminuent graduellement de nouveau jusqu'à s'annuler lorsque la bobine est perpendiculaire au champ. Celle-ci de nouveau poussée par son "inertie", dépasse cette position et le cycle recommence.

• On augmente la puissance d'un moteur en augmentant le nombre de bobines ainsi que le nombre de sections du cylindre. On divise ce cylindre en plusieurs parties égales isolées les unes des autres et à chaque deux partie opposées on relie les extrémités d'une bobine.

• Ces bobines forment entre elles des angles égaux, le nombre de sections du cylindre est le double du nombre de bobines et les deux balais sont en contact avec le cylindre pendant qu'il tourne.

## Enrichissons nos connaissances :

### Quand est-ce qu'un moteur brûle ?

• Durant sa rotation, la bobine du moteur coupe un nombre variable de lignes du flux magnétique de l'aimant. Ceci engendre dans la bobine une f.é.m. induite inverse qui tend à diminuer la vitesse de rotation de cette bobine.

• Cette f.é.m. inverse permet de régulariser la vitesse de rotation de la manière suivante :

a) La bobine est sous l'action de deux f.é.m. opposées, celle de la source qui est constante et l'autre induite qui est variable.
Si la vitesse augmente, la f.é.m. induite augmente, la f.é.m. résultante $= E_{source} - E_{induite}$ diminue, l'intensité du courant traversant la bobine diminue ce qui diminue sa vitesse.
b) Si la vitesse diminue, la f.é.m. induite diminue, l'intensité du courant augmente et la vitesse augmente.

• A un moment donné la f.é.m. induite se stabilise, la différence $E_{source} - E_{induite}$ devient constante et la vitesse de la bobine devient constante.

• Si l'on arrête le moteur pendant sa rotation et qu'il reste relié à la source, la bobine brûle car :
La f.é.m. inverse s'annule, la f.é.m. de la source agit entièrement sur la bobine, la résistance de celle-ci étant très faible, l'intensité du courant qui la traverse devient trop grande ce qui brûle le fil de la bobine.

## Enrichissons nos connaissances :

### Détection des métaux :

L'appareil détecteur des métaux, est basé sur la mesure de la variati on du coefficient de self-induction (L) d'une bobine en présence d'un métal proche. Ainsi, l'intensité du courant traversant l'appareil varie en présence de ce métal.

**Figure (11-18)**
Détection des métaux

# Enrichissons nos connaissances :

## Microphone et écouteur (haut-parleur)

• Le microphone à plaque mobile est basé sur les vibrations d'une plaque métallique mince sous l'effet des ondes sonores.

• Les vibrations produisent une variation dans l'intensité du champ magnétique dans un noyau en fer placé à l'intérieur d'une bobine ce qui engendre dans celle-ci une f.é.m. induite variable ayant les mêmes caractéristiques que celle du son (en intensité et en fréquence). Ainsi le signal sonore mécanique est transformé en signal électrique.

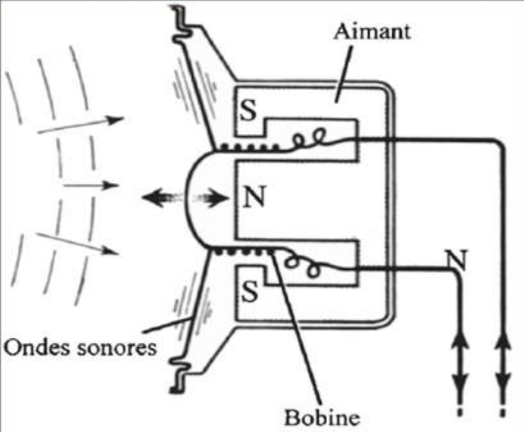


**Figure (11-19)**
Composition du microphone

• Dans l'écouteur ou le haut-parleur à bobine mobile, l'inverse se produit : le signal électrique variable engendre une variation dans l'intensité du courant traversant une bobine placée devant une plaque métallique mince. Celle-ci vibre sous l'action d'une force variable engendrée par la variation du champ magnétique. Il se produit une onde mécanique (sonore) ayant les mêmes caractéristiques que celles du signal électrique et le son est entendu.

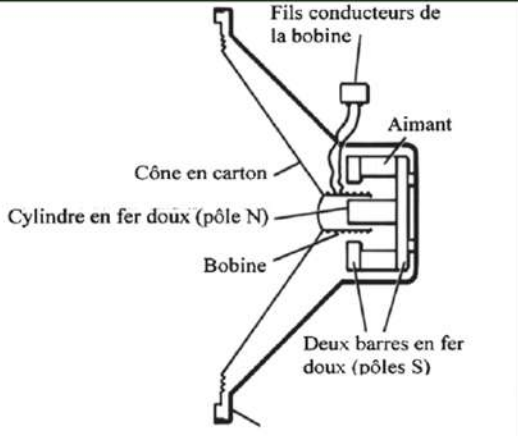


**Figure (11-20)**
Composition de l'écouteur

# Enrichissons nos connaissances :

## Circuit d'allumage du moteur d'une voiture (Bobine de Ruhmkorff)

• La bobine d'allumage (figure 11-21) est formée de deux bobines, l'une à l'intérieur de l'autre enroulées autour d'un noyau en fer doux. Le primaire et le noyau forment un électro-aimant, dont le circuit s'ouvre et se ferme par l'intermédiaire des cames du distributeur qu i tourne au moyen des pointes de contact en platine. Le secondaire est formé de milliers de spires où se produit par induction une f.é.m. intermittente à chaque fois que le circuit primaire est ouvert. Cette grande f.é.m. induite engendre une étincelle dans chacune des bougies du moteur à combustion interne.

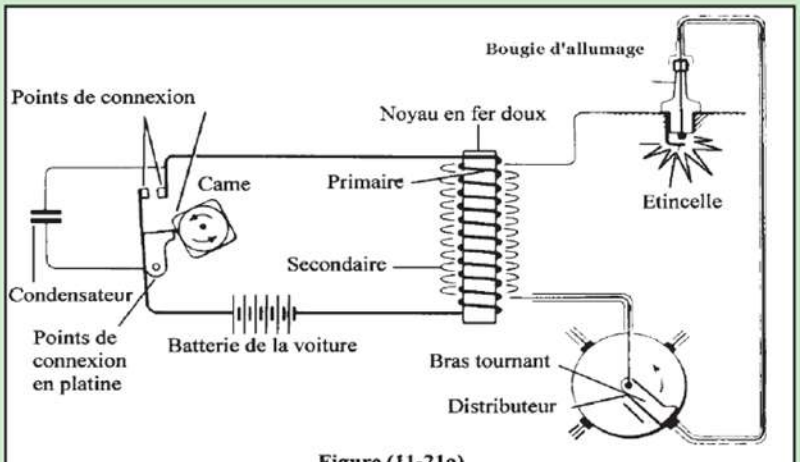


**Figure (11-21a)**
Circuit d'allumage du moteur d'une voiture

• Ces bougies s'allument l'une après l'autre durant la rotatio n du distributeur. Un condensateur est utilisé pour empêcher l'usure des pointes de contact qui peut se produire par les étincelles successives.

• Ce condensateur permet aussi d'obtenir une très grande f.é.m. induite entre les bornes du secondaire en produisant une forte étincelle à chaque rupture du courant du primaire.

• Les circuits d'allumage électroniques modernes fonctionnent de la même manière. Le transistor est utilisé comme interrupteur relié aux cames.

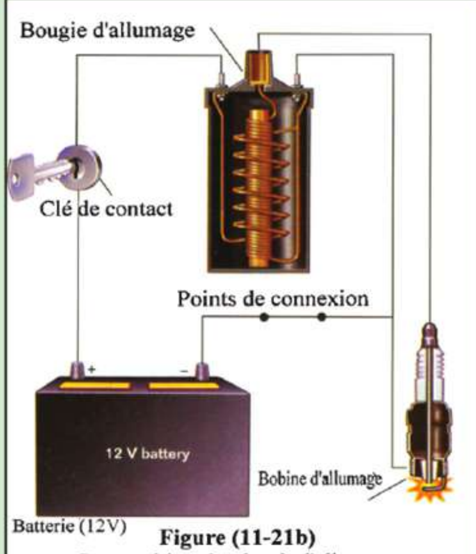


**Figure (11-21b)**
Composition du circuit d'allumage

# Résumé

**Définitions et concepts fondamentaux :**

• L'induction électromagnétique est le phénomène dans lequel sont engendrés une f.é.m. induite et un courant induit dans une bobine pendant le mouvement d'un aimant dans celle-ci.

• La présence d'un noyau en fer doux dans la bobine, concentre les lignes du flux magnétique et augmente le nombre de lignes de flux coupées par le fil de la bobine, ce qui augmente la f.é.m. induite ainsi que le courant induit.

• Loi de Faraday :
La f.é.m. induite engendrée dans une bobine par induction électromagnétique est proportionnelle au taux de variation du nombre de lignes de flux qui la traverse et au nombre de spires.

• Loi de Lenz :
Le sens du courant induit est tel qu'il s'oppose à la variation du flux magnétique qui lui donne naissance.

• Règle de Fleming de la main droite :
Plaçons le pouce, l'index et le majeur de la main droite dans trois directions perpendiculaires l'une à l'autre de telle sorte que le pouce pointe dans le sens du mouvement et l'index pointe dans le sens du champ, le majeur indique alors le sens du courant induit dans le fil.

• Induction mutuelle : C'est l'influence électromagnétique qui se produit entre deux bobines placées au voisinage l'une de l'autre (ou l'une à l'intérieur de l'autre). Lorsque l'une d'elles est traversée par un courant d'intensité variable l'autre est influencée par cette variation et s'oppose à elle.

• Self-induction : C'est l'influence électromagnétique qui se produit dans le conducteur lui-même pendant la variation de l'intensité du courant qui le traverse et qui s'oppose à cette variation.

• Le coefficient de self-induction d'une bobine est mesuré par la f.é.m. induite entre ses bornes quand l'intensité du courant qui la traverse varie au taux d'un ampère par seconde.

• L'unité de mesure du coefficient de self-induction est l'henry :
C'est la self-induction d'une bobine dans laquelle est engendrée une f.é.m. induite d'un volt lorsque l'intensité du courant qui la traverse varie au taux d'un ampère par seconde.

$$1 \text{ henry} = 1 \frac{volt.seonde}{ampère}$$

**• Le coefficient de self-induction d'une bobine dépend :**
de sa forme géométrique
du nombre de spires
de la distance qui les sépare
de la perméabilité magnétique de son noyau

• Le générateur du CA (dynamo) est un appareil qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique quand sa bobine tourne dans un champ magnétique.

• La dynamo se compose de :

1- un aimant fixe puissant
2- une bobine formée d'un fil en cuivre qui tourne entre les deux pôles de l'aimant
3- deux anneaux sur lesquels glissent deux balais pour obtenir un CA ou un cylindre creux fendu en plusieurs parties isolées pour obtenir un courant d'intensité presque constante.

• Le courant alternatif est un courant dont l'intensité et le sens varient régulièrement avec le temps.

• Transformateur électrique : c'est un appareil qui élève ou abaisse une tension alternative par induction mutuelle entre deux bobines.

• Rendement du transformateur : c'est le rapport entre l'énergie électrique du secondaire à celle du primaire

• Moteur électrique : c'est un appareil qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique.

**Formules importantes :**

• La f.é.m. induite engendrée dans une bobine formée de N spires causée par une variation de flux magnétique $\Delta\phi$ est calculée par la formule

$$\varepsilon = -N\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad \text{(en volt)}$$

• Le signe (–) indique que le sens de la f.é.m. induite qui est aussi celui du courant induit est opposé à celui de la variation du flux magnétique qui lui donne naissance.

• La f.é.m. induite engendrée dans une bobine secondaire causée par la variation $\Delta I_1$ de l'intensité du courant de la bobine primaire pendant un temps $\Delta t$ est calculée par la formule :

$$\varepsilon_2 = -M\frac{\Delta I_1}{\Delta t}$$

où M est le coefficient d'induction mutuelle entre les deux bobines.

• La f.é.m. induite engendrée dans une bobine par self-induction causée par la variation $\Delta I$ de l'intensité du courant qui la traverse pendant un temps $\Delta t$ est calculée par la formule :

$$\varepsilon = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

où L est le coefficient de self-induction.

• La f.é.m. induite dans un fil rectiligne de longueur $\ell$, se déplaçant à une vitesse uniforme v dans un champ magnétique de densité B, est calculée par la formule :

$$\varepsilon = B\, v\, \ell \sin\theta$$

où $\theta$ est l'angle compris entre le sens de la vitesse et celui du champ magnétique

• La f.é.m. instantanée dans la dynamo est calculée par la formule :

$$\varepsilon = N\, BA\, \omega \sin\theta$$

où N est le nombre de spires, B est la densité du flux magnétique, A est l'aire de section de la bobine, $\omega$ est la vitesse angulaire et $\theta$ est l'angle entre le sens de la vitesse et celui du champ. $\varepsilon$ est maximum si $\theta = 90°$ et elle et nulle si $\theta = 0°$.

$$\omega = \frac{\text{Nombre de tours}}{\text{temps en seconde}} \times 2\pi = 2\pi \text{ rad/sec.}$$

• La relation entre l'intensité efficace $I_{eff}$ du C.A et son intensité maximum $I_{max}$ est : $I_{eff} = 0{,}707\, I_{max}$

**Formules du transformateur électrique :**

1. Relation entre les f.é.m. $V_s$ et $V_p$

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

2. Relation entre les intensités $I_s$ et $I_p$ :

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p}$$

3. Rendement du transformateur :

$$\eta = \frac{V_s\, I_s}{V_p\, I_p} \times 100$$

## Questions et exercices

### 1) Mettre le signe (√) devant la réponse correcte :

1 – L'index d'un galvanomètre relié aux extrémités d'un solénoïde dévie en faisant sortir rapidement un aimant de la bobine car :

a) Le nombre de spires de la bobine est grand
b) La bobine coupe les lignes du flux magnétique
c) Le nombre de spires de la bobine est petit
d) Le nombre de spires de la bobine est convenable

2 – L'index du galvanomètre relié aux extrémités d'une bobine dévie, en faisant sortir l'aimant, en sens contraire à celui obtenu en introduisant l'aimant car :

a) Le sens du courant induit engendré est contraire à celui engendré en introduisant l'aimant
b) Un courant électrique est engendré
c) Il y a une diminution du nombre des lignes de flux magnétique
d) Le nombre des lignes de flux varie
e) Le nombre des lignes de flux ne change pas

3 – La valeur de la f.é.m. induite engendrée dans une bobine en introduisant ou en sortant l'aimant dépend de :

a) (l'intensité du courant – la longueur du fil – le nombre de lignes du flux)
b) (la force de l'aimant – la vitesse de l'aimant – le nombre de spires de la bobine)
c) (l'aire de section de la bobine – la masse de l'unité de longueur du fil de la bobine – la matière du fil de la bobine)
d) (la longueur du fil – le nombre de spires – le genre de l'aimant)
e) (la densité du flux – le temps – l'intensité du courant)

4 – Si l'on introduit une bobine secondaire dont les extrémités sont reliées à un galvanomètre dont le zéro est au milieu du cadran, dans une bobine primaire traversée par un courant électrique, l'index du galvanomètre :

a) Dévie en sens contraire à celui du courant du primaire
b) Indique zéro
c) Est croissant
d) Dévie dans le même sens que celui du courant du primaire
e) Est variable

5 – Si le courant traversant la bobine primaire s'annule, lorsqu'elle est à l'intérieur de la bobine secondaire, il se produit :

a) Un courant induit direct
b) Un champ électrique
c) Un courant induit inverse
d) Un courant alternatif
d) Un champ magnétique

6 – La croissance du courant dans un solénoïde est très lente à cause de :

a) Un courant induit direct est engendré
b) Un champ magnétique est engendré
c) Une f.é.m. induite inverse est engendrée et elle s'oppose à la d.d.p. principale
d) Un flux magnétique est engendré
e) Un champ électrique est engendré

7 – Les résistances étalons sont fabriquées d'un fil replié sur lui-même pour;

a) Diminuer la résistance du fil
b) Augmenter la résistance du fil
c) Eliminer la self-induction
d) Annuler la résistance du fil
e) Faciliter la connexion

8 – On peut déterminer le sens du courant induit dans la dynamo par:

a) La règle de Fleming de la main gauche
b) La loi de Lenz
c) La règle de Fleming de la main droite

9 – Le taux de découpage des lignes du flux magnétiques dans la dynamo est maximal lorsque :

a) Le plan de la bobine est perpendiculaire au champ
b) Le plan de la bobine est incliné d'un angle de 30°
c) L'aire de la bobine est minimale
d) L'aire de la bobine est maximale
e) Le plan de la bobine est parallèle au champ

10 – La relation entre l'intensité du courant traversant les deux bobines d'un transformateur et le nombre de spires est :

a) Directement proportionnelle
b) Inversement proportionnelle
c) Dépend de la nature du fil
d) Dépend de la température du fil
e) Dépend de la température du milieu ambiant

11– La puissance d'un moteur augmente, en utilisant :

a) Un grand nombre de spires
b) Plusieurs bobines qui forment entre elles des angles égaux
c) Plusieurs aimants
d) Un fil en cuivre isolé
e) Un redresseur de courant

12– Le rapport entre l'énergie électrique du secondaire à celle du primaire est appelé :

a) Energie perdue
b) Energie fournie
c) Rendement du transformateur
d) Force de fonctionnement du transformateur
e) Energie gagnée

## 2) Définir ce qui suit:

1- L'induction électromagnétique
2- La loi de Faraday de la f.é.m. induite
3- La loi de Lenz
4- La règle de Fleming de la main droite
5- L'induction mutuelle
6- L'unité de mesure de l'induction mutuelle
7- La self-induction
8- Le coefficient de self-induction
9- L'henry
10- La bobine d'induction
11- Le courant alternatif
12- La dynamo
13- Le moteur
14- Le transformateur électrique
15- Le rendement du transformateur
16- La force contre électromotrice dans le moteur

## 3) Questions de cours:

1. Quels sont les facteurs dont dépend la f.é.m. induite dans un conducteur ? Citer la relation entre ces facteurs et la f.é.m. induite.

2. Citer la loi de Faraday de la f.é.m. induite dans une bobine. Comment peut-on la vérifier expérimentalement ?

3. Que veut-on dire par :
   a) L'induction mutuelle entre deux bobines
   b) Le coefficient d'induction mutuelle

   Comment peut-on prouver la loi de Lenz en utilisant l'induction mutuelle ?

4. Si une bobine est traversée par un courant, déduire une relation entre la f.é.m. induite dans cette bobine et la variation de l'intensité du courant qui la traverse. Déduire ensuite une définition du coefficient de self-induction et de l'henry.

5. Quand est-ce que la f.é.m. induite engendrée dans une bobine est maximale et quand est-ce qu'elle est nulle ?

6. Décrire une expérience pour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique et une autre pour transformer l'énergie électrique en énergie mécanique. Citer la règle utilisée pour déterminer le sens du courant dans le $1^{er}$ cas et celle utilisée pour déterminer le sens du mouvement dans le $2^{ème}$ cas.
7. Déduire la relation utilisée pour calculer la f.é.m. induite instantanée dans la dynamo.
8. Quelles sont les modifications nécessaires pour obtenir un courant redressé dans la dynamo à CA ?
9. Décrire le transformateur électrique et expliquer son principe de fonctionnement. Que veut-on dire par : Le rendement d'un transformateur est 80 % ?
10. Que veut-on dire par : le rendement d'un transformateur ?
    Quels sont les facteurs qui le diminue et comment l'améliorer ? Est-ce que le rendement d'un transformateur peut être 100 % ?
11. Décrire avec un schéma le moteur électrique et expliquer son principe de fonctionnement

## 3) Commenter :

a) Le noyau d'un transformateur est fabriqué de plaques minces, isolées les unes des autres.
b) Le noyau en fer doux au silicium ne s'aimante pas si on enroule autour de lui un fil replié sur lui même qui est traversé par un courant continu.
c) Un fil libre de mouvement et traversé par un courant, se déplace lorsqu'il est placé dans un champ magnétique
d) Le transformateur électrique n'est pas utilisé pour élever ou abaisser une f.é.m. continue.
e) La vitesse de rotation de la bobine du moteur est uniforme.
f) Le courant s'annule très rapidement dans un fil rectiligne, plus lentement dans une bobine (à noyau en air) et beaucoup plus lentement dans une bobine ayant un noyau en fer doux.
g) Les extrémités de la bobine d'une dynamo utilisée pour obtenir un courant redressé sont reliées à un cylindre métallique creux fendu en deux moitiés qui sont isolées l'une de l'autre.

## 4) Exercices :

1. Une bobine formée de 80 spires, de 0,2 $m^2$ d'aire de section, est placée perpendiculairement à un champ magnétique uniforme. Si une f.é.m. induite moyenne de 2V est engendrée lorsque la bobine fait ¼ de tour en 0,5 s, calculer la densité du flux magnétique. (Réponse : 0,0625T)

2. Si la densité du flux magnétique entre les deux pôles de l'aimant d'un générateur de courant est 0,7 T et la longueur du fil de la bobine est 0,4m, calculer la vitesse de ce fil, lorsqu'une f.é.m. induite de 1volt, y est engendrée. (Réponse : 3,57m/s)

3. La bobine d'une dynamo, formée de 800 spires, de 0,25 $m^2$ d'aire de section, tourne avec une fréquence de 600 tours par minute dans un champ magnétique de densité 0,3T. Calculer la f.é.m. induite engendrée lorsque la normale au plan de la bobine forme 30° avec le champ. (Réponse : 6,28V)

4. Une barre en cuivre de 30 cm de longueur se déplace perpendiculairement à un champ magnétique de densité 0,8 T à une vitesse de 0,5 m/s. Calculer la f.é.m. induite engendrée. (Réponse : 0,12V)

5. Calculer le coefficient de self-induction d'une bobine dans laquelle est engendrée une f.é.m. induite de 10V lorsque l'intensité du courant qui la traverse varie au taux de 40 A/s. (Réponse : 0,25H)

6. Le coefficient d'induction mutuelle entre deux bobines est 0,1H et le courant qui traverse l'une d'elles est de 4A. Si ce courant s'annule en 0,01s, calculer la f.é.m. induite engendrée dans l'autre bobine. (Réponse : 40V)

7. Une bobine rectangulaire de dimensions 0,4 m × 0,2 m, formée de 100 spires tourne à une vitesse angulaire constante de 500 tours par minute dans un champ magnétique de densité 0,1T. L'axe autour duquel tourne la bobine est perpendiculaire au champ. Calculer la f.é.m. induite maximale engendrée dans cette bobine. (Réponse : 41,89V)

8. Un transformateur a un rendement de 90 %, la tension du primaire est 200V et celle du secondaire est 9V. Si l'intensité du courant traversant la bobine primaire est 0,5A et son nombre de spires est 90, calculer l'intensité du courant traversant la bobine secondaire et son nombre de spires. (Réponse : 10A, 1800 spires)

9. Un transformateur abaisseur fonctionne avec une source de f.é.m. 2500V et le courant traversant la bobine secondaire est 80A. Si $\frac{Np}{Ns} = 20$ et le rendement de ce transformateur est 80 %, calculer la f.é.m. induite dans la bobine secondaire et l'intensité du courant traversant la bobine primaire. (Réponse : 100V, 4A)

# Chapitre 4

## Les circuits du courant alternatif

La dynamo est un générateur du courant alternatif.

On'a déja etudié

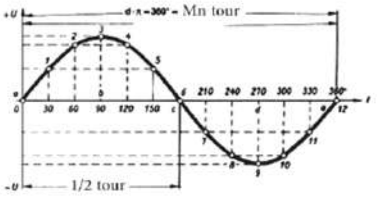
Le courant alternatif est un courant dont l'intensité augmente d'abord de zéro à une valeur maximale puis diminue à nouveau jusqu'à zéro. Ensuite, elle augmente jusqu'à une valeur maximale et diminue dans le sens inverse jusqu'à revenir à zéro.

Le courant alternatif est donc un courant dont l'intensité et le sens varient périodiquement.

Le courant alternatif et la f.é.m. alternative sont représentés graphiquement par une courbe sinusoïdale.

La fréquence du courant alternatif: est le nombre d'oscillations effectuées en une seconde ou c'est le nombre de tours effectués par la dynamo en une seconde.

La fréquence du courant alternatif en Égypte = 50Hz.




(figure1-4)

### Avantages du courant alternatif:-

1- On peut élever ou abaisser son potentiel au moyen des transformateurs électriques.

2- À l'aide des transformateurs, on peut transporter l'énergie électrique de lieu de production au lieu d'utilisation sans perte sensible.

3- On peut l'utiliser dans tous les domaines.

4- On peut facilement le transformer en courant continu afin de l'utiliser pour l'électrolyse et la galvanoplastie.

5- Il a un effet thermique lorsqu'il traverse une résistance ohmique (comme le courant continu) car l'effet thermique ne dépend pas du sens du courant.

### Mesure de l'intensité du courant alternatif

L'ampèremètre à cadre mobile ne convient pas à mesurer l'intensité du courant alternatif car il est basé sur l'effet magnétique du courant qui dépend de la valeur et du sens du courant et le courant alternatif est un courant dont l'intensité et sens varient périodiquement.

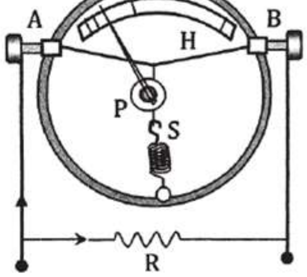
La mesure du courant alternatif est basée sur son effet thermique.

La figure ci – contre représente l'appareil utilisé pour Mesurer l'intensité du courant alternatif. Il est connu sous le nom "d'ampèremètre à fil chaud" ou l'ampèremètre thermique

### Description de l'appareil

Il se compose d'un fil fin en alliage de platine – iridium tendu entre deux vis, A et B. Ce fil est attaché en son milieu à un fil de tension qui, à son tour, est relié à un fil de soie puis à un ressort pour le maintenir tendu. Ce fil passe sur une poulie (P) qui tourne autour de son axe. La poulie est reliée à une aiguille qui se déplace sur un cadran gradué irrégulièrement.

Le fil de platine – iridium est relié en parallèle avec un shunt R.



## Fonctionnement

L'appareil est relié en série dans le circuit dont on veut mesurer l'intensité du courant qui le traverse.

Quand un courant électrique passe dans le fil fin, sa température s'élève et il se dilate. Le ressort tire alors le fil de soie ce qui fait tourner la poulie et l'aiguille se déplace devant le cadran puis s'immobilise devant une graduation déterminée en indiquant la valeur efficace du courant.

L'aiguille s'immobilise quand la quantité de la chaleur engendrée dans le fil est égale à celle dissipée c.à.d. quand sa température devient constante.

Les graduations du cadran ne sont pas régulières: elles sont serrées au début puis écartées à la fin car la chaleur engendrée dans le fil est directement proportionnelle au carré de l'intensité du courant.

## Inconvénients de l'appareil:

1- Son aiguille se déplace lentement avant de s'immobiliser. De même, il dévie lentement à zéro quand le courant s'annule.

2- Le fil fin est influencé par la température du milieu ambiant (mis à zéro), pour cela il est tendu sur une plaque d'une matière ayant le même coefficient de dilatation.

## Les circuits du courant alternatif

### 1- Le courant alternatif et la différence de potentiel alternative dans une résistance ohmique.

Quand on ferme le circuit représenté par la figure (4-3 ) qui se compose d'une source de courant alternatif, d'un interrupteur et d'une résistance ohmique reliés en série, la différence de potentiel aux bornes de la résistance est: $V = V_{max} \sin \omega t$ ..........(1)

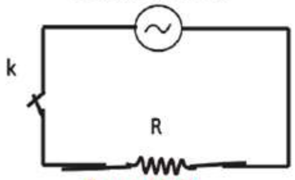


figure (4-2)

tel que V est la valeur instantanée de la différence de potentiel,

$V_{max}$ la valeur maximale,

$\omega t$ l'angle de phase.

L'intensité du courant instantanée est déterminée par la relation

$$I = \frac{V}{R}$$

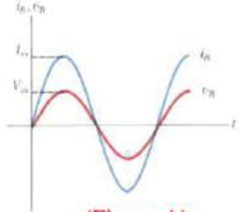
$$\therefore I = \frac{V_{max}}{R} \sin \omega t$$

$I = I_{max} \sin \omega t$ ..........(2)

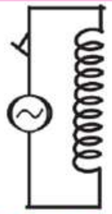
En comparant les relations (1) et (2), nous constatons que V et I dans la résistance ont le même angle de phase. Ou en d'autres termes V et I ont la même phase.

En les représentant graphiquement figure (A), nous remarquons que V et I atteignent leur valeur maximale ensemble et leur valeur minimale ensemble, figure (B)

(Figure B)


(Figure A)

**2- Le courant alternatif et la différence de potentiel alternative dans une bobine d'induction de résistance ohmique négligeable.**



(figure 4-3)

La figure ( 4-4 ) représente un circuit comprenant une source de courant alternatif, un interrupteur, une bobine d'induction de résistance négligeable montés en série.

Quand on ferme le circuit, un courant électrique circule et il augmente graduellement $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ varie au cours du temps de zéro à une valeur maximale

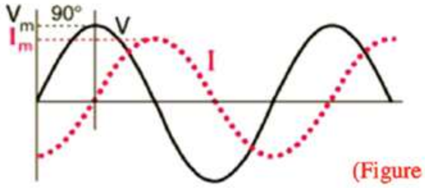
Une f.é.m. induite est engendrée par la self – induction de la bobine égale à $-L\frac{\Delta I}{\Delta t}$ (le signe négatif indique que la f.é.m. induite est opposée à la f.é.m. alternative de la source.

La valeur instantanée de la différence de potentiel est déterminée par la relation

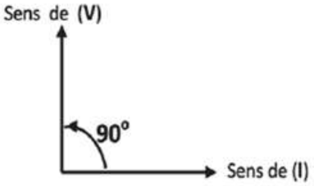
$$V = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Sachant que I varie avec l'angle de phase selon une relation sinusoïdale comme indiqué dans la figure ( 4-4 ) alors $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ qui représente la pente de la tangente à la courbe, est maximale lorsque Lintenstté du covrsant = 0 et diminue graduellement et atteint zéro lorsque la valeur de I est maximale.

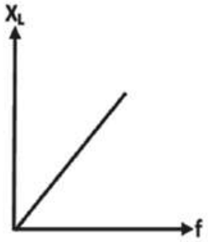
Lorsque l'intensité diminue, la valeur de la pente $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ est négative.




(Figure 4-4)




(Figure 4-5)




La figure montre que la différence de potentiel est en avance sur I d'un angle de phase de 90°.

La figure (4-5) montre les deux vecteurs V et I.

**La réactance d'induction ou inductance de la bobine $X_L$**

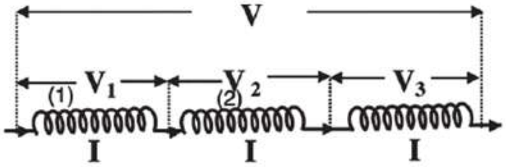
C'est l'opposition d'une bobine au passage du courant alternatif à cause de sa self induction

$X_L = 2\pi fL$ ($\Omega$)

où L est le coefficient d'auto – induction de la bobine (henry) et f est la fréquence du courant (Hz)

De la relation précédente, nous constatons que la réactance de la bobine est directement proportionnelle à la fréquence du courant.

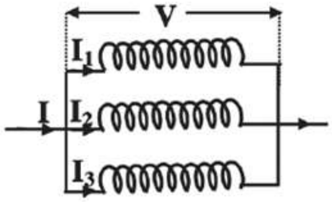
**La réactance de plusieurs bobines**




Si elles sont reliées en série

$X_L = X_{L1} + X_{L2} + X_{L3}$

Si les réactances sont égales, alors $X_L = n\, X_{L1}$




Si elles sont reliées en parallèle

$$\frac{1}{X_L} = \frac{1}{X_{L1}} + \frac{1}{X_{L2}} + \frac{1}{X_{L3}}$$

Si les réactances sont égales, alors $X_L = \frac{X_{L1}}{n}$

**Exemple**

Une bobine dont l'auto – induction est 700 mH et la résistance négligeable, est reliée à une source de courant alternatif dont la f.é.m. est 200 volts et la fréquence 50 Hz Calculer l'intensité du courant qui traverse la bobine.

*Solution*

$$X_L = 2\pi fL = 2 \times \frac{22}{7} \times 50 \times 0{,}7 = 220\ \Omega$$

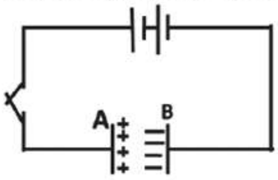
$$I = \frac{V}{X_L} = \frac{200}{220} = 0{,}9A$$

**Le courant alternatif et la d.d.p. dans le circuit d'un conducteur**

Le condensateur électrique est constitué de deux armatures parallèles en métal séparées par un isolant. Lorsqu'on charge le condensateur, l'une des armatures est de charge positive, l'autre de charge négative et entre elles une d.d.p. (V). Si la charge sur une des armatures est (Q) et la capacité du condensateur est (C), la relation entre ses facteurs est $\therefore Q = C.V$, la charge est mesurée en coulomb, la d.d.p. en volt, alors la capacité sera en farad.

**Le conducteur avec une source continue.**

Lorsqu'on relie un condensateur avec une pile de sorte que l'armature (A) est reliée au pôle positif et l'armature (B) au pôle négatif de la pile (comme indique la figure), alors une charge négative se déplace du pôle négatif vers l'armature (B) et son potentiel diminue, alors la charge négative de l'armature (B) influe sur l'armature (A) et attire la charge positive à la surface de (A) proche de (B) et chasse une charge négative sur la face lointaine et se déplace vers le pôle positif de la pile et le potentiel de (A) augmente ; lorsque la d.d.p. entre les deux armatures s'égalise avec la d.d.p. entre les deux pôles de la pile, le déplacement des charges s'arrête, alors le condensateur se charge.

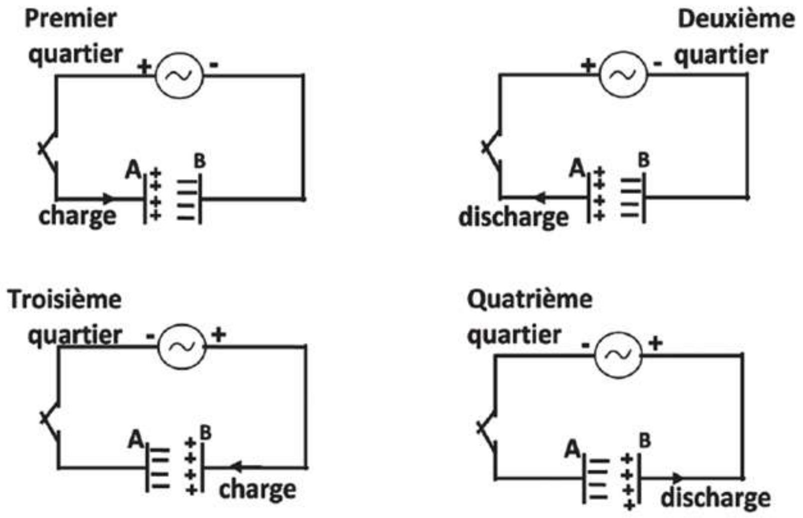



Ceci veut dire qu'un courant instantané traverse le circuit puis s'arrête pour charger le condensateur.
La charge = la capacité du condensateur x d.d.p

**Le condensateur avec une source alternative**

Lorsqu'on relie le condensateur à une source électrique alternative, lors du 1er demi tour se charge durant le quart de rotation jusqu'à ce que la d.d.p entre ses armatures atteigne une limite maximale égale à la limite maximale de la f.é.m. de la source, puis la f.é.m. de la source commence à baisser et le potentiel du condensateur étant plus élevé, il se décharge dans la source jusqu'à ce que la f.é.m. de la source et le potentiel du condensateur soient zéro, ceci arrive lors du 1er demi tour.
Lors du 2ème demi tour, le condensateur se charge par des charges opposées comme indique la figure ( ) jusqu'à ce que le potentiel entre ses armatures atteigne la limite maximale de la f.é.m. de la source, puis commence à se décharger lorsque la f.é.m. de la source baisse et les deux atteigne le zéro à la fin du 2ème demi tour et ceci se répète dans les autres tours.

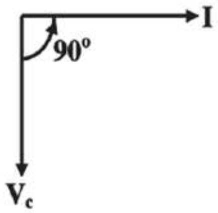
On peut dire qu'un courant alternatif traverse un circuit ayant une source alternatif et un condensateur, i.e. Le condensateur permet le passage du courant alternatif dans le circuit et l'intensité du courant est directement proportionnelle avec le taux du changement de la charge du condensateur ou la d.d.p, car la charge et la d.d.p entre ses armatures ont même phase comme indique la figure ( ).

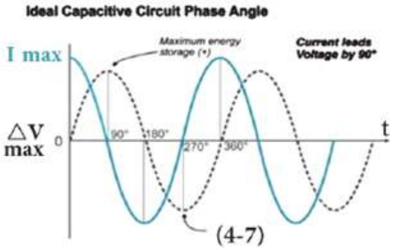



Comme $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ , $Q = CV$ $\longrightarrow$ $\therefore I = C\frac{\Delta V}{\Delta t}$

V change avec l'angle de la phase sous forme d'une courbe sinusoïdale comme indique la figure (4 - 7).

$\frac{\Delta V}{\Delta t}$ représente la pente de la tangente à la courbe ; elle est maximale lorsque l'angle de la phase = 0 et diminue graduellement pour atteindre zéro lorsque V est maximale ; et lorsque V diminue, la pente de la tangente est négative et l'intensité du courant instantané a une valeur négative, etc...

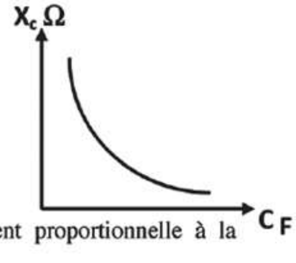



(4-7)

La relation entre la réactance et

La capacité du condensateur




La réactance du condensateur $X_C$ est calculée par la relation

$X_C = \frac{1}{2\pi fc}$ où f est la fréquence du courant

De cette relation, nous tirons que la réactance du condensateur est inversement proportionnelle à la fréquence du courant et à la capacité du condensateur.

De la figure ( ), nous tirons que I est en avance sur V d'un angle de phase de 90°

La réactance du condensateur est son opposition au passage du courant alternatif à cause de sa capacité

## Association de condensateurs

1- en série:

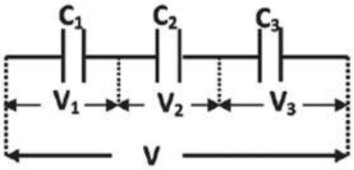
Ils sont chargés par la même quantité d'électricité Q

$V = V_1 + V_2 + V_3$

$$\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3}$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Si les capacités sont égales $C = \frac{C_1}{n}$




2- en parallèle:

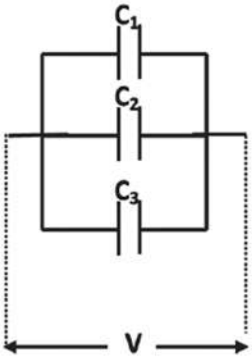
La différence de potentiel est la même

$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$

$VC = VC_1 + VC_2 + VC_3$

$C = C_1 + C_2 + C_3$

Si les capacités sont égales $C = nC_1$




## Exemple

Trois condensateurs de 20 µF, 80 µF et 40 µF sont reliés en parallèle avec une source de f.é.m. 100 V et de fréquence 50 Hz. Calculer l'intensité du courant traversant le circuit.

*Solution*

$C = C_1 + C_2 + C_3 = 20 + 80 + 40 = 140 \times 10^{-6} F$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fc} = \frac{1 \times 7 \times 10^{-6}}{2 \times 22 \times 50 \times 140} = 22{,}72\ \Omega$$

$$I = \frac{100}{27{,}72} = 4{,}4\ A$$

## L'impédance (Z)

C'est l'opposition totale d'un circuit composé d'une résistance ohmique, d'une bobine d'induction et d'un condensateur, au passage du courant alternatif.

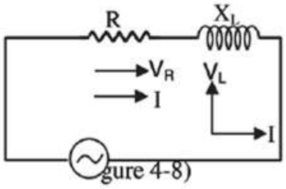
Elle effectivement la combinaison de la résistance, de la réactance d'induction et de la réactance de capacité.

## Circuit à courant alternatif formé d'une résistance ohmique et d'une bobine d'induction reliés en série

La figure (4-8 ) montre un circuit formé d'une résistance (R) et d'une bobine de self – induction (L) reliés en série avec la source du courant alternatif.

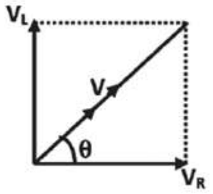
uand on ferme le circuit, la d.d.p. aux bornes de la bobine ($V_L$) est en avance sur la d.d.p. aux bornes de la résistance (R) avec un angle de phase 90°

On utilise le diagramme vectoriel pour calculer la d.d.p. totale



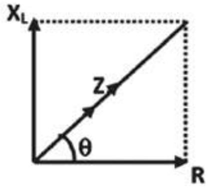

gure 4-8)

$V = \sqrt{V^2_R + V^2_L}$




$\tan \theta = \frac{V_L}{V_R} = \frac{X_L}{R}$

or $V_R = IR$, $V_L = IX_L$ et $V = IZ$




donc $Z = \sqrt{R^2 + X^2_L}$

alors la d.d.p. totale est en avance sur I d'un angle de phase que nous pouvons déterminer par la relation

**Exemple**

Une résistance 40 Ω et une bobine de self – induction $\frac{21}{220}$ H sont reliés à une source de courant alternatif dont la f.é.m. est 80 volts et la fréquence 50 Hz. Calculer

1- L'impédance.

2- La d.d.p. aux bornes de la résistance et celle aux bornes de la bobine. Est qu'on peut calculer leur somme algébriquement?

*Solution*

1- $X_L = 2\pi fL = 2 \times \frac{22}{7} \times 50 \times \frac{21}{220} = 30\ \Omega$

$Z = \sqrt{R^2 + X^2_L} = \sqrt{40^2 + 30^2} = 50\ \Omega$

$I = \frac{V}{Z} = \frac{80}{50} = 1{,}6A$

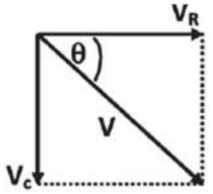
2- $V_R = 1{,}6 \times 40 = 64$ V

$V_L = 1{,}6 \times 30 = 48$ V

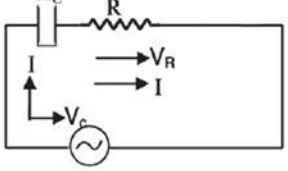
Leur somme algébrique V = 64 + 48 = 112 V, plus grande que la f.é.m. de la source, mais si on trouve la somme des vecteurs

$V = \sqrt{V^2_R + V^2_L} = \sqrt{64^2 + 48^2} = 80V$ = la f.é.m. de la source

## Circuit à courant alternatif formé d'un condensateur de capacité (C) et d'une résistance R reliés en série




Quand on ferme le circuit, la d.d.p. entre les bornes du condensateur $V_C$ est en retard sur la d.d.p. aux bornes de la résistance $V_R$ d'un angle de phase 90°.




La d.d.p. totale $V = \sqrt{V^2_R + V^2_C}$

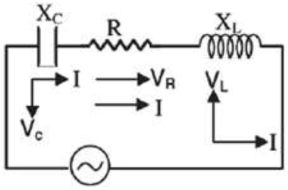
or $V_R = IR$, $V_C = IX_C$ et $V = IZ$

donc $Z = \sqrt{R^2 + X^2_C}$

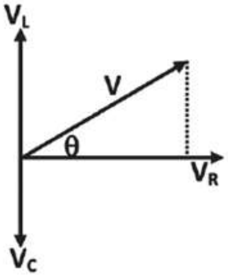
alors la d.d.p. totale est en retard sur I d'un angle de phase que nous pouvons déterminer par la relation

$$tg\theta = \frac{-V_L}{V_R} = \frac{-X_C}{R}$$

## Circuit à courant alternatif formé d'un condensateur de capacité (C), d'une bobine de self – induction (L) et d'une résistance R reliés en série




Quand on ferme le circuit, soient les d.d.p. $V_L$ aux bornes de la bobine, $V_C$ aux bornes du condensateur et $V_R$ aux bornes de la résistance. Représentons $V_R$ par un vecteur horizontal sur l'axe des x, $V_L$ par un vecteur vertical sur l'axe des y dans le sens positif et $V_C$ par un vecteur vertical sur l'axe des y dans le sens négatif. La d.d.p. totale V est la somme des trois vecteurs $V_R$, $V_L$ et $V_C$




$V = \sqrt{V^2_R + (V_L - V_C)^2}$

or $V_R = IR$, $V_L = IX_L$, $V_C = IX_C$ et $V = IZ$

donc $IZ = I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ (divisons par I)

donc $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

$$tg\theta = \frac{V_L - V_C}{V_R} = \frac{X_L - X_C}{R}$$

Il est à noté que

1- Si $X_L > X_C$, tan θ est positif et la d.d.p. totale est en avance sur I
2- Si $X_L < X_C$, θ tan est négatif et la d.d.p. totale est en retard sur I
3- Si $X_L = X_C$, θ tan = zéro et la d.d.p. totale et I sont en phase

4- La puissance dissipée dans la bobine est nulle car elle emmagasine la puissance sous forme d'un champ magnétique. De même la puissance dissipée dans un condensateur est nulle car il emmagasine la puissance sous forme d'un champ électrique.

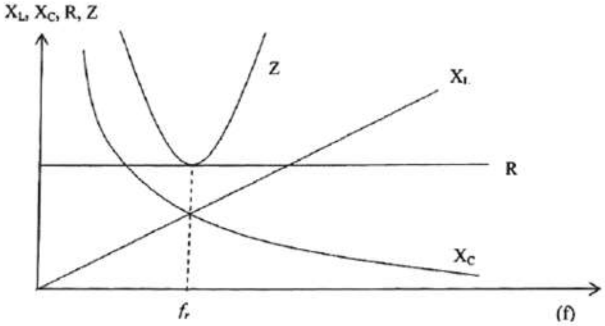
En revanche le passage du courant dans la résistance est accompagné d'une perte d'énergie électrique sous forme d'énergie thermique.

**Exemple**

Un circuit comprend une résistance, une bobine et un condensateur reliés en série avec une source de courant alternatif de f.é.m. 50V. Si l'intensité du courant traversant le circuit = 2A, la d.d.p. aux bornes de la résistance est alors 40V, celle aux bornes de la bobine = 80V et celle aux bornes du condensateur = 50V.

Tracer le diagramme vectoriel puis calculer

1- la d.d.p. total.
2- l'angle de phase.
3- la puissance dissipée
4- l'impédance




*Solution*

$$V = \sqrt{(40)^2 + (80-50)^2} = 50V$$

$$tg\theta = \frac{80-50}{40}$$

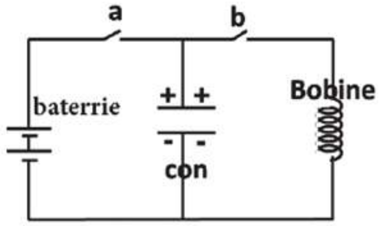
$$\theta = 37^{\circ}$$

la résistance $R = \frac{V_R}{I} = \frac{40}{2} = 20\,\Omega$ et la puissance $I^2R = (2)^2 20 = 80$ W

l'impédance $Z = \frac{50}{2} = 25\ \Omega$

**Circuit oscillant**

Permutation de l'énergie emmagasinée dans une bobine sous forme de champ magnétique et dans un condensateur sous forme de champ électrique. Le circuit oscillant est composé d'une bobine d'induction de très petite résistance et un condensateur reliés par l'intermédiaire d'un interrupteur (b) comme indique la figure.



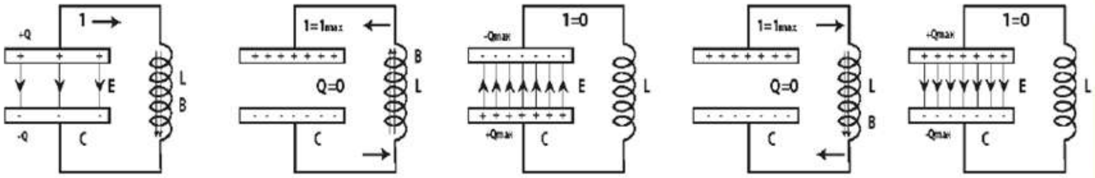

1- On fermant l'interrupteur (a), un courant instantané traverse et charge le condensateur, l'armature reliée au pôle positif est positif et celle reliée au pôle négatif est négatif, le courant s'arrête et se forme un champ électrique entre les deux armatures du condensateur qui emmagasine l'énergie sous forme d'énergie électrique, puis en ouvrant (a) le condensateur reste chargé.

2- En ouvrant l'interrupteur (a) et fermant l'interrupteur (b) le condensateur se décharge à travers la bobine et un courant instantané traverse de l'armature positive vers l'armature négative, la d.d.p diminue entre les armatures du condensateur jusqu'à anéantissement, le champ électrique disparaît et le courant traversant la bobine engendre un champ magnétique qui emmagasine l'énergie du champ électrique.

Au commencement, le taux de al variation du courant traversant la bobine est grande à cause de la grandeur de la d.d.p entre les deux armatures puis diminue, et cette diminution de l'intensité du courant engendre dans la bobine par self induction un courant induit qui attire plus de charges positives de l'armature positive vers celle négative, ainsi l'armature négative se charge positivement et vice-versa (c-à-d de charges opposées avant le décharge) engendrant ainsi une d.d.p de sens opposé.

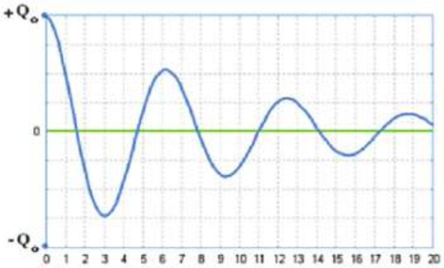
Entre les deux armatures un champ électrique est engendré et le courant dans la bobine diminue ainsi que le champ magnétique jusqu'à anéantissement, et l'énergie emmagasinée sous forme de champ magnétique se transforme en champ électrique une deuxième fois dans le condensateur.

Ensuite, le condensateur se décharge dans le sens contraire au premier déchargement, ainsi le chargement et le déchargement se répètent engendrant des oscillations électriques très rapides dans le circuit tout en observant l'investissement continuel de l'énergie entre les deux champs.



A cause de la résistance de la bobine et les fils, une partie de l'énergie se transforme en chaleur graduellement, l'intensité du courant alternatif diminue dans le circuit, la d.d.p entre les deux armatures diminue graduellement jusqu'à anéantissement, le chargement et le déchargement s'arrêtent ainsi que le courant. C'est pourquoi on peut approvisionner le condensateur de charges supplémentaires pour compenser cette diminution et continuer le chargement et le déchargement.

Le schéma montre la disparition de la charge entre les armatures du condensateur avec le temps.



## La fréquence du courant dans un circuit oscillant

Dans un circuit résonant, la réactance d'induction est égale à la réactance de capacité, l'intensité du courant est alors maximale

$\therefore X_L = X_C$

$2\pi f L = \frac{1}{2\pi f C}$

$\therefore f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ (Hz)

On peut calculer le coefficient de self – induction de la bobine par la relation $L = \frac{\mu A N^2}{\lambda}$ (henry)

Question: Citer les facteurs dont dépend la fréquence de résonance

**Exemples**

1- Calculer la fréquence de résonance dans un circuit qui se compose d'une bobine de self – induction 4,9 μH et d'un condensateur de capacité 16 mF

$\therefore f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{4{,}9\text{x}10^{-3}\text{x}16\text{x}10^{-6}}} = 568{,}8$ Hz

2- Une bobine est reliée avec un condensateur de capacité18 μF, la fréquence de résonance est 2 x $10^4$Hz. Si la même bobine est reliée avec un autre condensateur, la fréquence de résonance est alors 3 x $10^4$Hz, calculer la capacité du $2^{ème}$ condensateur.

$f \propto \frac{1}{\sqrt{C}}$

$\therefore \frac{f_1}{f_2} = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}$

$\therefore C_2 = 8\ \mu F$

Le circuit résonant permet seulement le passage du courant qui a la même fréquence que celle de la résonance. Si on veut recevoir un signal déterminé, on doit varier la fréquence du circuit en variant la capacité du condensateur ou le nombre de spires de la bobine. Le signal reçu est alors amplifié et redressé dans le récepteur.

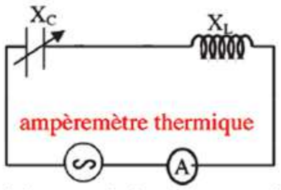
**Circuit de résonance (oscillations forcées)**

Il se compose d'un condensateur de capacité variable et d'une bobine qu'on peut changer le nombre de spires.

Le but (l'usage) : on l'utilise dans les appareils de réception sans fil pour choisir la station radiophonique qu'on veut écouter.

**Interprétation du fonctionnement du circuit :**

On relie le circuit comme indique la figure :

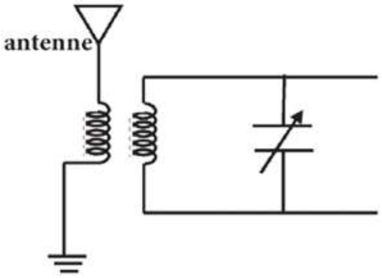



Une source de courant alternatif de fréquence variable, un condensateur de capacité variable, d'une bobine d'induction et un ampèremètre thermique. Le courant traverse et en variant la fréquence de la source électrique on varie l'intensité du courant : cette intensité diminue si la différence entre la fréquence de la source et celle du circuit est grande, et elle augmente si les fréquences de la source et du circuit se rapprochent. L'intensité du courant est grande lorsque la fréquence du circuit s'accorde avec celle de la source, c-à-d que l'efficacité d'induction égale à celle de la capacité. On peut la fréquence de la source, ou varier la capacité du condensateur, ou le nombre de spires de la bobine pour s'accorder avec celle de la source.

On peut comparer ce qui arrive dans le circuit de résonance avec la résonance dans le son : le son augmente lorsque la fréquence de deux diapasons en vibration est identique et s'affaiblit si leurs fréquences sont différentes.

On déduit que si dans un circuit de résonance il y a des sources électriques de fréquences différentes en même temps, le circuit ne permet que le passage du courant dont la fréquence s'accorde avec sa fréquence ou très proche de sa fréquence, dans ce cas le circuit est appelé circuit de résonance.

Le circuit de résonance dans les appareils de réception ou sans fils :




Le circuit de résonance est relié à l'appareil sans fils à une antenne.

L'antenne reçoit des ondes de différentes stations radiophoniques chacune ayant une fréquence déterminée, ces ondes agissent sur l'antenne et engendre des courants ayant la même fréquence des stations

## Résumé

1- Le courant alternatif est un courant dont l'intensité augmente d'abord de zéro à une valeur maximale puis diminue à nouveau jusqu'à zéro. Ensuite, elle augmente jusqu'à une valeur maximale et diminue dans le sens inverse jusqu'à revenir à zéro.

2- L'ampèremètre thermique: est un appareil utilisé pour mesurer la valeur efficace du courant alternatif et il est basé sr son effet thermique.

3- La réactance d'induction d'une bobine: C'est l'opposition d'une bobine au passage du courant alternatif à cause de sa self induction $X_L = 2\pi fL\ (\Omega)$

4- La réactance d'induction de plusieurs bobines reliées en série: $X_L = X_{L1} + X_{L2} + X_{L3}$

5- La réactance d'induction de plusieurs bobines reliées en parallèle: $\frac{1}{X_L} = \frac{1}{X_{L1}} + \frac{1}{X_{L2}} + \frac{1}{X_{L3}}$

6- La réactance de capacité d'un condensateur: c'est son opposition au passage du courant alternatif à cause de sa capacité $X_C = \frac{1}{2\pi fc}\ (\Omega)$

7- La capacité totale de plusieurs condensateurs reliés en série: $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$

8- La capacité totale de plusieurs condensateurs reliés en parallèle: $C = C_1 + C_2 + C_3$

9- L'impédance : c'est l'équivalent de la résistance, de la réactance d'induction et de la réactance de capacité dans un circuit. $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)}^2$

10- La fréquence de résonance $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

## Exercices

1- Que veut – on dire par:
La réactance d'induction – la réactance de capacité – l'impédance – circuit oscillant.

2- Citer les facteurs dont dépend:-
La réactance d'induction – la réactance de capacité – l'impédance – la fréquence de résonance.

3- Comment peut – on calculer la capacité totale de plusieurs condensateurs :
a- reliés en série b- reliés en parallèle.

4- De quoi se compose un circuit oscillant? Expliquer son fonctionnement.

5- De quoi se compose un circuit résonant? Comment ce circuit est utilisé dans les postes récepteurs?

6- Calculer la capacité totale de deux condensateurs de 24 μF et 48 μF s'ils sont reliés :-
a- en série b- en parallèle

7- Une résistance 12 Ω et une bobine de self – induction $\frac{7}{440}$H sont reliés à une source alternative sa fréquence est de 50 Hz. Calculer l'impédance. (13 Ω)

8- Une bobine dont la self – induction est $\frac{7}{275}$ H et sa résistance ohmique = 6 Ω. Calculer l'intensité du courant qui la traverse si:-
a- elle est reliée à une pile de f.é.m. 6V et de résistance interne négligeable.
b- elle est reliée à une source alternative de 6V et de fréquence 50 Hz. (1A – 0,6A)

9- Trois condensateurs, chacun de capacité 14 μF, sont reliés en parallèle avec une source alternative de fréquence 50 Hz. Calculer la capacité totale.

10- Un circuit de courant alternatif se compose d'une résistance 6 Ω, d'une bobine de self – induction 0,28 H et d'un condensateur de réactance 80 Ω, reliés en série une source de f.é.m. 20 V et de fréquence 50 Hz. Calculer:

a- la d.d.p. entre les bornes du condensateur.

b- l'angle de phase

c- la valeur maximale de l'intensité du courant traversant le circuit. (160V – 53° – 2,8A)

11- Le circuit de l'antenne d'un poste récepteur de radio dont la résistance 50 Ω comprend un condensateur de capacité variable et une bobine dont la self – induction est 10 mH. Si une onde de fréquence 980 KHz engendre dans ce circuit une d.d.p. de $10^{-4}$V, calculer la capacité du condensateur en résonance ainsi que l'intensité du courant traversant le circuit dans ce cas. ($2,635 \times 10^{-12}$ F, $2 \times 10^{-6}$ A)

12- Un circuit de courant alternatif se compose d'une résistance 100 Ω, d'une bobine de réactance 250 Ω et d'un condensateur de capacité variable, reliés en série avec une source alternative de f.é.m. 200 V et de fréquence $\frac{1000}{44}$ Hz. Si l'intensité du courant traversant le circuit est maximal, calculer:-

a- La capacité du condensateur.

b- La d.d.p. entre les bornes de la bobine et celle entre les bornes du condensateur.

($28 \times 10^{-6}$ F, 500 V)

13- Dans le circuit ci – contre:

La fréquence de la source = 50 Hz, sa f.é.m. = 220 V, la capacité du condensateur = 4 μF et le coefficient de self – induction de la bobine = 2,53 H. Calculer:

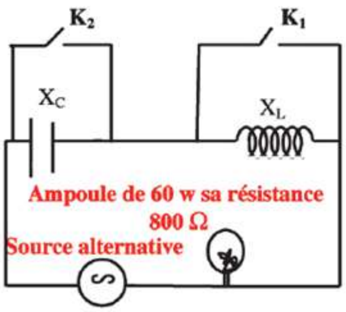
a- La réactance du condensateur.

b- La réactance d'induction.

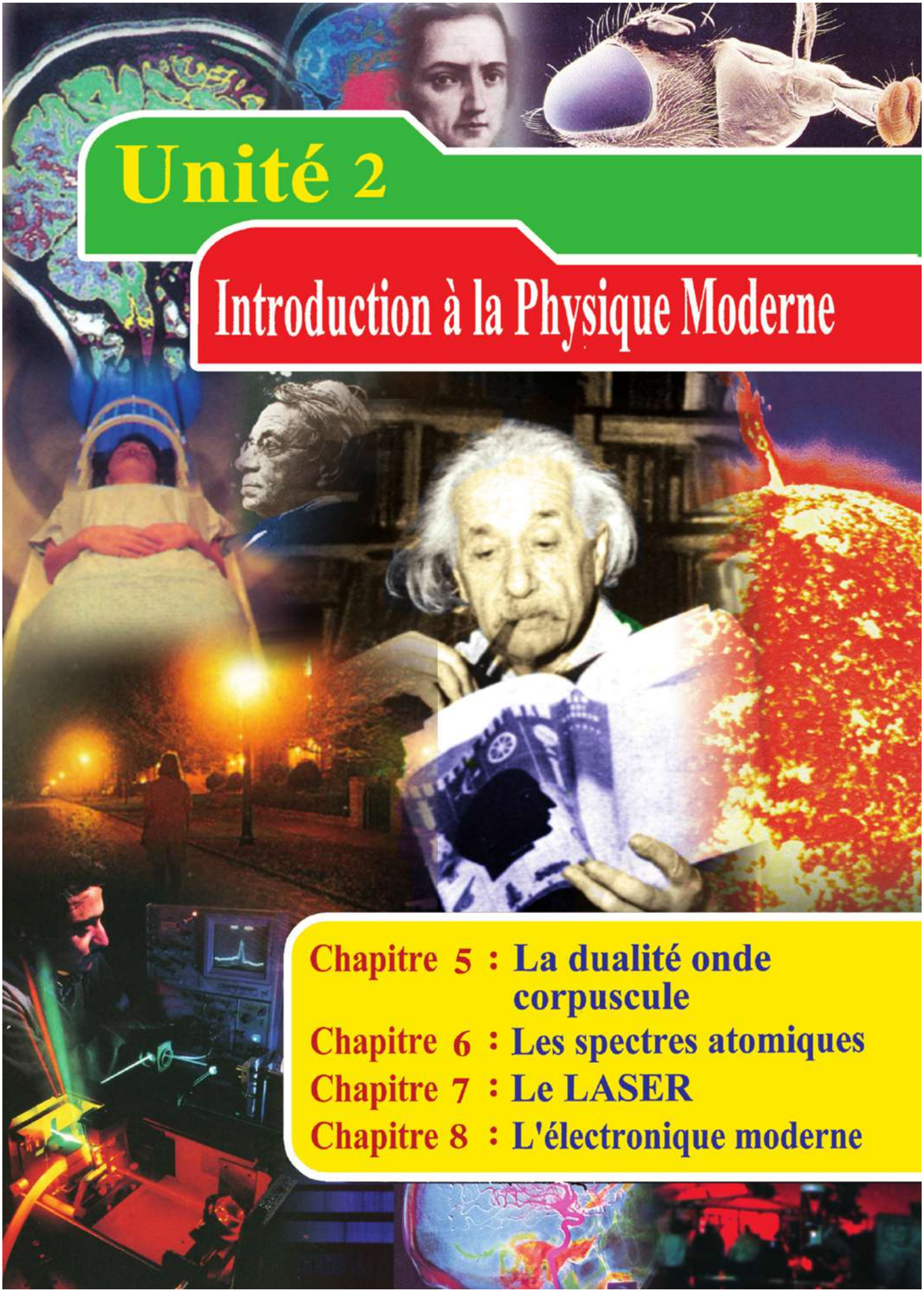
c- Que se passe – t – il à la luminosité de l'ampoule si on ferme $K_1$ seulement? Calculer l'impédance.

d- Que se passe – t – il à la luminosité de l'ampoule si on ferme $K_2$ seulement? Calculer l'impédance.

e- Que se passe – t – il à la luminosité de l'ampoule si on ferme $K_1$ et $K_2$ ? Calculer l'impédance.




(795,4 Ω – 795,4 Ω – 1128 Ω)



# Unité 2

## Introduction à la Physique Moderne

Chapitre 5 : La dualité onde corpuscule

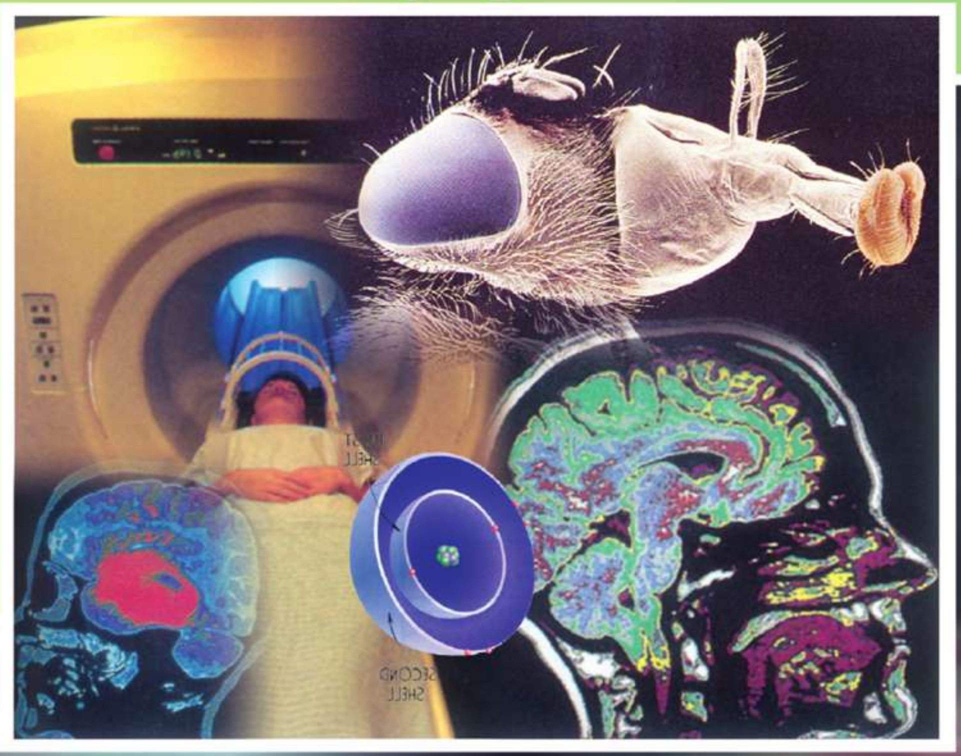
Chapitre 6 : Les spectres atomiques

Chapitre 7 : Le LASER

Chapitre 8 : L'électronique moderne

# Introduction à la Physique Moderne

# Unité 2



## Chapitre 5 : La dualité onde corpuscule

# Unité 2 : Introduction à la Physique Moderne

## Chapitre 5

## La dualité onde corpuscule

### Introduction :

• Tout ce que l'on a précédemment étudié est classé sous le nom de "physique traditionnelle ou classique". Ce nom ne signifie pas que cette physique est devenue inutile, mais elle nous permet d'expliquer certaines observations quotidiennes et les expériences ordinaires.

• La cinquième unité comporte quelques concepts fondamentaux de la physique moderne qui sont considérés comme une introduction à la "Physique Quantique". Celle-ci traite de plusieurs phénomènes scientifiques qui ne sont pas observés habituellement, mais qui existent dans l'univers et que la physique classique ne peut pas expliquer, en particulier lorsqu'on traite de sujets à l'échelle atomique ou subatomique.

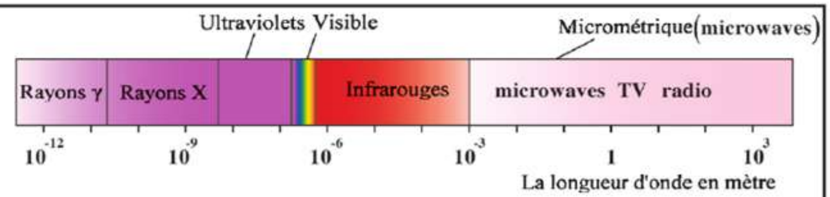
• Cette branche nous permet d'interpréter tous les phénomènes qui sont à la base de l'électronique et des télécommunications modernes. Elle permet aussi d'interpréter les réactions chimiques au niveau de la molécule, sujet traité par le Savant Ahmed Zouwail (prix Nobel 1999) qui a pu photographier certaines de ces réactions qui se produisent à une très grande vitesse.

### Radiation d'un corps noir :

• La lumière a été considérée jusque l à comme étant un genre d'onde.

• Or les ondes ont les propriétés suivantes : la réflexion, la réfraction, l'interférence et la diffraction.

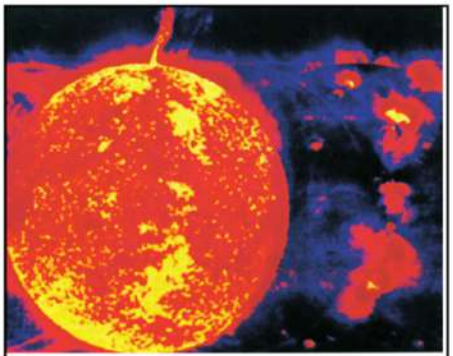
• La lumière visible représente une partie très limitée du spectre des ondes électromagnétiques (figure 12-1).



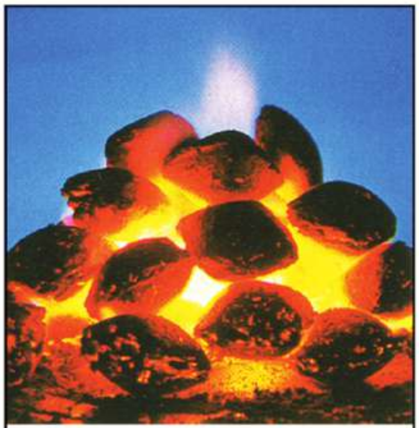

**(Figure 12-1)**
Le spectre électromagnétique

• Les ondes électromagnétiques diffèrent par leurs fréquences et leurs longueurs d'ondes, mais elles se propagent dans le vide à une vitesse constante ($c = 3 \times 10^8$ m/s) et elles n'ont pas besoin d'un milieu matériel pour se propager.

• Nous remarquons que les corps chauds émettent de la lumière et de la chaleur. Prenons comme exemple le soleil (figure 12-2), les étoiles, un morceau de charbon incandescent (figure 12-3) et une ampoule électrique (figure 12-4).



**(Figure 12-2)**
Soleil source de radiations électromagnétiques



**(Figure 12-3)**
Un morceau de charbon incandescent émet des radiations électromagnétiques

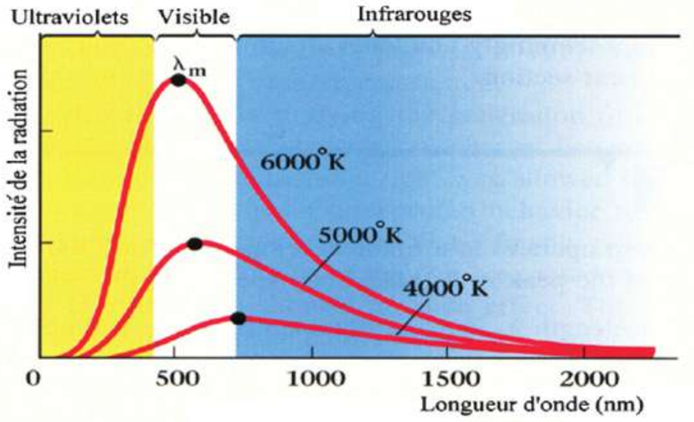
**(Figure 12-4a)**
Des ampoules incandescentes

**(Figure 12-4b)**
Une ampoule moins incandescente

**L'ampoule électrique émet des radiations électromagnétiques**

• Nous remarquons aussi que la couleur prédominante émise varie selon la source, c'est-à-dire que la source n'émet pas toutes les longueurs d'ondes avec la même intensité mais que l'intensité de la radiation varie avec la longueur d'onde.

• Le graphique représentant la relation entre l'intensité de la radiation et la longueur d'onde est connu sous le nom de "courbe de distribution de Planck". (figure 12-5).




**(Figure 12-5)**
**La longueur d'onde de la crête est inversement proportionnelle à la température.**

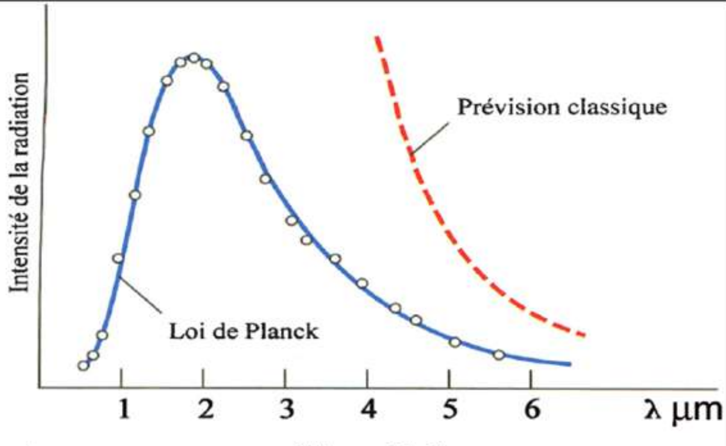
• On trouve s ur ces courbes que la longueur d'onde de la radiation la plus intense est inversement proportionnelle à la température de la source, c'est ce qu'on appelle "la loi de Wien".
C'est-à-dire que plus la température augmente, plus la longueur d'onde de la radiation la plus intense diminue.

• On remarque aussi que si on diminue ou si on augmente fortement la longueur d'onde, l'intensité de la radiation émise tend vers zéro.

• Prenons le Soleil comme exemple :
La température à la surface du Soleil atteint 6000K, ce qui rend la longueur d'onde de la radiation la plus intense 5000Å (0,5 micron) c'est-à-dire une lumière située dans le spectre visible. 40% de l'énergie radiante du Soleil est formée de lumière visible, 50% (environ) est formée de radiations thermiques (infrarouges) et le reste se situe dans les autres régions du spectre des ondes électromagnétiques.

• On peut obtenir la même distribution de radiations à partir d'une ampoule électrique incandescente (3000K). Environ 20% des radiations sont formées de lumière visible, le reste est sous forme de chaleur. La longueur d'onde de la crête de la courbe est d'environ 1000 nm = $10^{-6}$ m = 1 micron (figure 12-5).

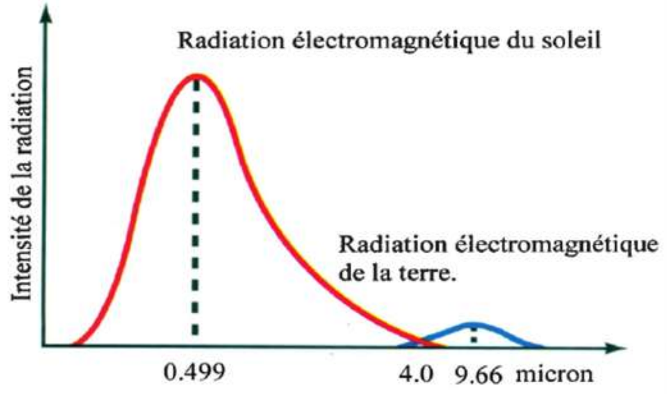
• Nous ne pouvons pas expliquer ces observations par la physique classique qui énonce que puisque les radiations sont des ondes électromagnétiques, leur intensité doit augmenter avec l'augmentation de la fréquence (c'est-à-dire avec la diminution de la longueur d'onde). Or pourquoi l'intensité de la radiation diminue avec l'augmentation de la fréquence ? (figure 12-6)




**(Figure 12-6)**
L'intensité de la radiation diminue avec l'augmentation de la fréquence, ce qui est le contraire de la prévision classique

• En 1900 le savant Planck a pu expliquer ce p hénomène.
Il a constaté que la courbe précédente se répète avec tous les corps chauds qui émettent un spectre continu de radiations, non seulement le Soleil, mais aussi la Terre et les êtres vivants.

• La Terre étant un corps non incandescent, elle absorbe les radiations solaires puis elle les émet à nouveau. Sa basse température par rapport à celle du Soleil lui permet d'émettre des ondes dont la cr ête a une longueur d'onde d'environ 10 microns qui est située dans la région des radiations infrarouges (figure 12-7).




**(Figure 12-7)**
Comparaison entre la radiation de la terre et celle du soleil

• Il existe des satellites artificiels et des appareils de mesure portables dans l'atmosphère ou sur Terre qui peuvent photographier les différentes parties du spectre émis, comme les radiations infrarouges émises par la Terre ainsi que les radiations du spectre visible (figure 12-8). Ces appareils utilisent aussi les ondes micrométriques (microwaves) utilisées dans les radars.

**(Figure 12-8)**
Photo du Sinaï Sud prise par le satellite artificiel LandSat

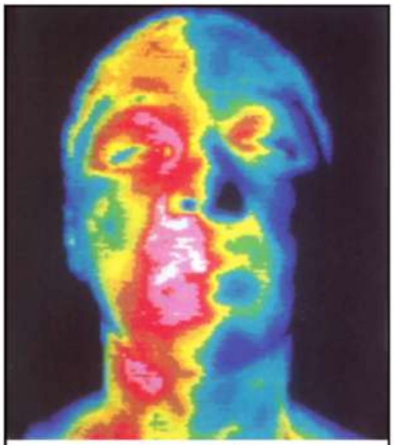
• Les savants analysent les photos captées pour déterminer la position des ressources naturelles sur terre.

• Ces appareils sont aussi utilisés dans les applications militaires, comme la vision nocturne à rayons infrar ouges pou r observer les corps mobiles dans l'obscurité sous l'effet de l'émission de leurs radiations thermiques (figure 12-9 ; 12-10).

**(Figure 12-9)**
Appareil de vision nocturne

**(Figure 12-10)**
Photo prise par l'appareil de vision nocturne

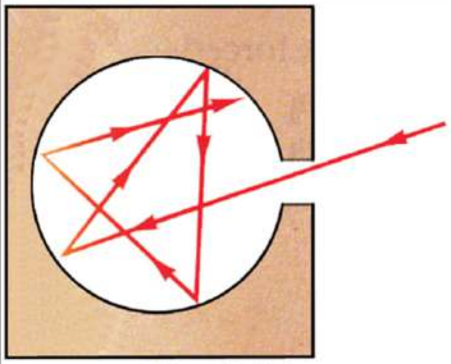
• De même l'imagerie thermique est utilisée en médecine, en particulier dans l'étude des tumeurs (tomographie) (figure 12-11), des embryons et de la criminologie car les radiations thermiques émises par une personne restent un certain temps même après son départ. Cette technique est appelée la (télédétection) où l'Egypte est pionnière dans ce domaine.



(Figure 12-11)
Image thermique du visage et du cou.

• Revenons à Planck qui a nommé ce phénomène "radiation d'un corps noir" car le corps noir est celui qui absorbe toutes les longueurs d'ondes des radiations incidentes (absorbeur parfait) puis il les émet totalement (émetteur parfait).

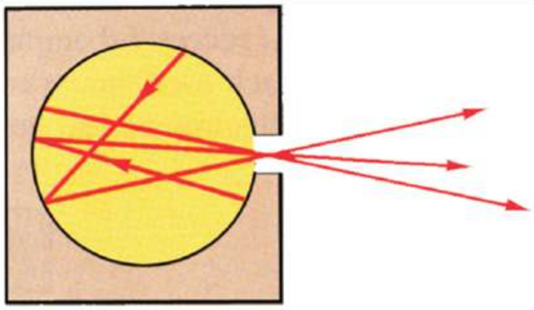
• Imaginons une cavité fermée contenant un petit trou. L'intérieur de cette cavité apparaît noire car la plupart des radiations incidentes y sont piégées par de multiples réflexions et une très faible partie est émise. C'est ce qu'on appelle : "radiation d'un corps noir" (figure 12-12).



(Figure 12-12a)
Ce qui rentre à l'intérieur de la cavité ne sort pas, c'est pourquoi elle apparaît noire

• Planck a interprété le phénomène de la radiation d'un corps noir en s'appuyant sur une h ypothèse qui était nouvelle à son époque. Il a supposé que cette radiation est formée de "petites unités" ou "grains d'énergies" appelés chacun "quantum" ou "photon".

De cette manière, la radiation émise par un corps incandescent est un énorme flux de photons émis par ce corps. L'énergie de ces photons augmente avec l'augmentation de la fréquence et leur nombre diminue plus l'énergie augmente.



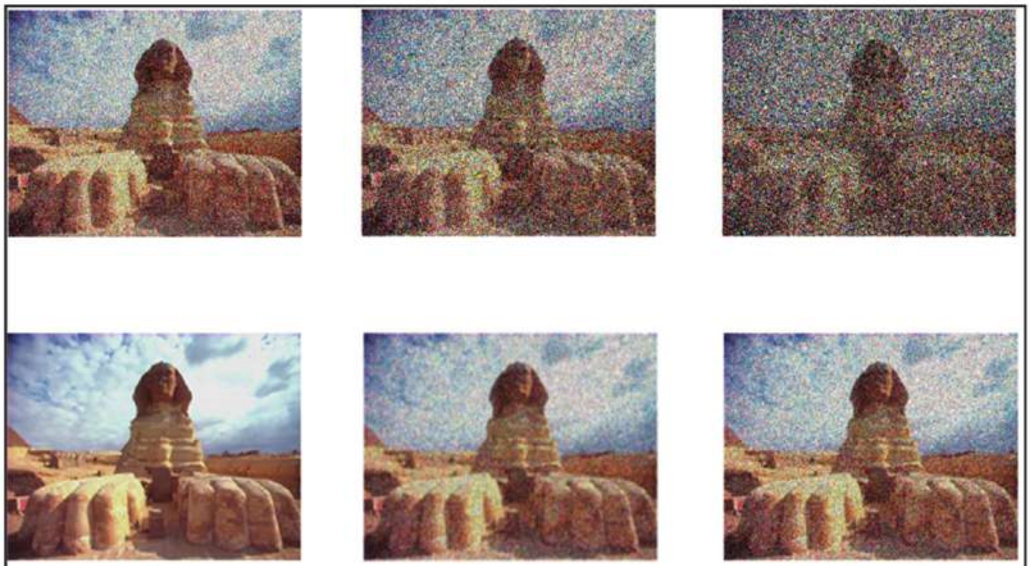
(Figure 12-12b)
Ce qui sort de l'ouverture est très faible : " radiation d'un corps noir"

• Ces photons sont produits par l'oscillation des atomes. L'énergie de ces atomes vibrants est discontinue c'est-à-dire "quantifiée" ou "discrète". Elle ne peut pas prendre n'importe quelle valeur.
Les niveaux d'énergie de ces atomes prennent des valeurs ($E=nh\nu$) où h est la constante de Planck ($h = 6{,}625\times10^{-34}$ J.s), $\nu$ est la fréquence en Hertz et n est un nombre entier.

• L'atome n'émet pas de radiations tant qu'il se trouve à un certain niveau d'énergie. Lorsque l'atome vibrant passe d'un niveau d'énergie supérieur à un autre inférieur, il émet un photon d'énergie $E=h\nu$. Ainsi on aura des photons de grande énergie si la fréquence ($\nu$) est grande et réciproquement des photons de faible énergie si leur fréquence est faible.

• La radiation émise étant formée de milliards de photons de diverses fréquences et énergies, on ne peut pas observer le comportement d'un photon individuel mais on verra la radiation totale qui a des propriétés conformes à la théorie classique des ondes.

• La (figure 12-13) illustre des photos prises pour un même objet avec une quantité de lumière qui augmente graduellement (c'est-à-dire que le nombre de photons incidents augmente par photo). Il est utile de savoir que l'œil peut être impressionné en ne r ecevant qu'un seul photon.

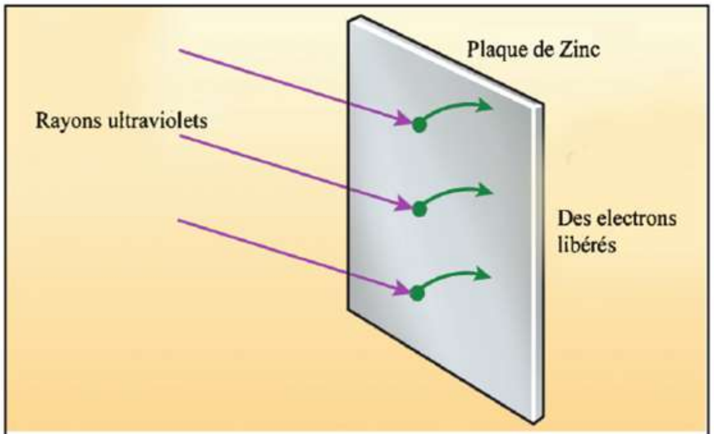


**(Figure 12-13)**
Le nombre de photons incidents augmente par photo de (a) vers (f)

## L'effet photoélectrique et l'émission thermique:

• Les métaux renferment des ions positifs et des électrons libres qui peuvent se déplacer à l'intérieur du métal mais qui ne peuvent pas l e quitter à cause des forces d'attraction qui les attirent toujours vers l'intérieur. C'est ce qu'on appelle : barrière superficielle de potentiel.

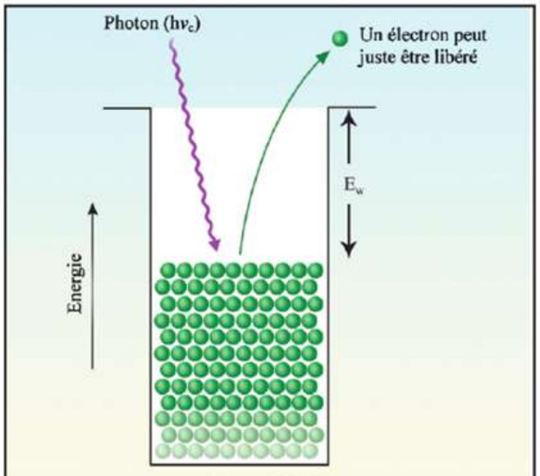
• Mais quelques électrons libres peuvent s'échapper de l'atome si on leur donne une énergie thermique ou lumineuse suffisante (figure 12-14). C'est le principe de fonctionnement du "tube à rayons cathodiques" (TRC) utilisé dans les télévisions et les ordinateurs (figure 12-15).




**(Figure 12-14a)**
L'électron est libéré du métal si on lui fournit une énergie suffisante.

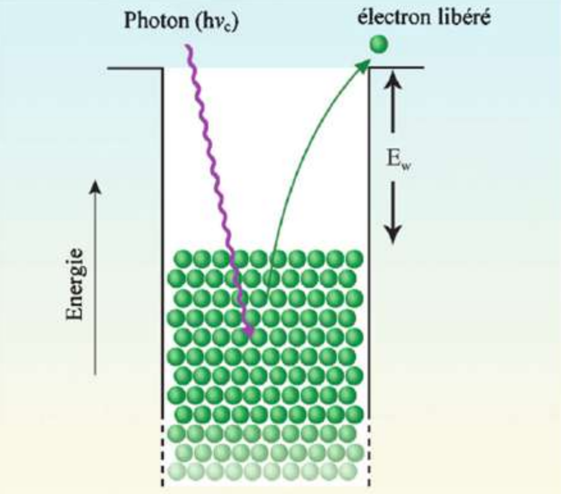
• Ce tube est formé d'une électrode métal lique appelée "cathode" qui est chauffée par un filament. Le chauffage de la cathode permet de libérer quelques électrons de la force d'attraction superficielle. Ces électrons vont vers un écran relié à une électrode positive appelée anode, ce qui engendre un courant dans le circuit extérieur. Le "canon à électrons" est la partie comprise entre le filament et les anodes.

• Lorsque ces électrons heurtent l'écran celui-ci émet de la lumière dont l'intensité diffère d'un point à un autre selon le nombre d'électrons incidents qui dépend de l'intensité du signal électrique envoyé. Ce contrôle se fait par l'intermédiaire d'une grille interceptant le trajet des électrons et dont le potentiel varie suivant l'intensité du signal.

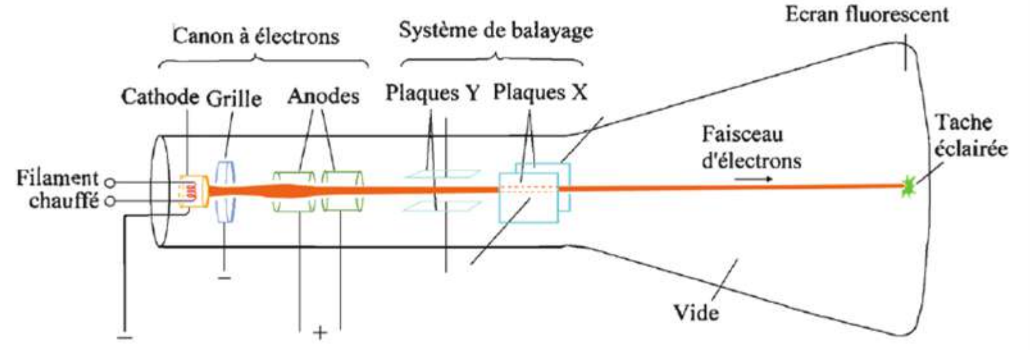



**(Figure 12-14b)**
Valeur minimale d'énergie qui peut libérer l'électron (travail d'extraction)

• Le faisceau d'électrons balaie l'écran à l'aide de champs électriques ou magnétiques. Ainsi chaque point de l'écran reçoit un nombre d'électrons différent, ce qui permet de former un e image.




(Figure 12-14c)
L'électron le plus lié a besoin de plus d'énergie



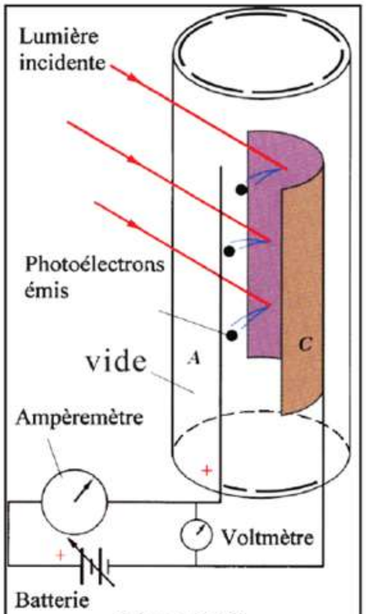

(Figure 12-15)
Tube d'une télévision ou d'un ordinateur (TRC)

• Si au lieu de chauffer la cathode, on l'éclaire par une lumière convenable, un courant traverse le circuit ce qui signifie que les électrons ont été libérés sous l'action de la lumière. C'est ce qu'on appelle l'effet photoélectrique (figure 12-16).

L'effet photoélectrique est l'émission d'électrons de la surface d'un métal éclairé par une lumière convenable (figure 12-16).

• La théorie classique de la lumière qui considère que celle-ci est formée d'ondes ne peut pas interpréter ce phénomène pour les raisons suivantes :

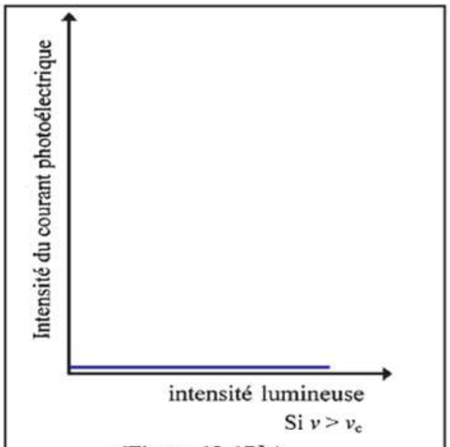
D'après cette théorie les ondes lumineuses incidentes sur le métal donnent de l'énergie aux électrons libres de celui-ci pour être libérés. Ainsi le nombre de photoélectrons émis ainsi que l'énergie cinétique (ou la vitesse de ceux-ci) doit augmenter avec l'augmentation de l'intensité lumineuse incidente. Aussi, d'après cette théorie, si l'intensité lumineuse n'est pas assez grande, il suffit d'exposer le métal plus longtemps à la lumière pour donner aux électrons libres de ce métal l'énergie suffisante pour le quitter.



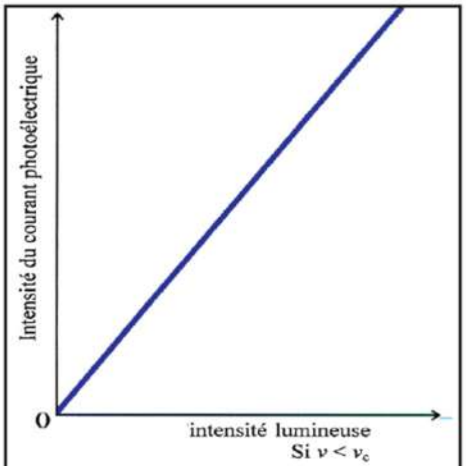

(Figure 12-16)
Courant photoélectrique produit par l'absorption de photons d'une surface métallique
**cellule photoelectrique**

• Les observations expérimentales sont totalement différentes de celles prédites par la théorie classique :

1) On a constaté que l'émission des photoélectrons dépend avant tout de la fréquence de la lumière incidente et non de son intensité. Les électrons, ne peuvent être émis que si la fréquence $\nu$ de la lumière incidente est supérieure ou égale à une fréquence limite $\nu_C$, quelque soit l'intensité ($\nu \geq \nu_C$). A ce moment seulement l'intensité du courant photoélectrique (ou le nombre d'électrons émis) augmente avec l'intensité lumineuse incidente (figure 12-17)




(Figure 12-17 b)
Variation du courant photoélectrique avec l'intensité lumineuse




(Figure 12-17a)
Variation du courant photoélectrique avec l'intensité lumineuse

2) On a aussi constaté que l'énergie cinétique (ou la vitesse) des électrons émis dépend de la fréquence $\nu$ de la lumière incidente et non de son intensité. Les photoélectrons sont émis instantanément et n'ont pas besoin de temps pour accumuler l'énergie lorsque l'intensité lumineuse est faible.
Même pour une faible intensité lumineuse, les électrons sont émis si la fréquence $\nu$ de la lumière incidente est supérieure ou égale à la fréquence limite $\nu_C$.

• Einstein fut le premier à interpréter le phénomène photoélectrique en présentant une nouvelle théorie sur la lumière. Il remporta pour cela le prix Nobel de sa théorie en 1921.

Voici le résumé de sa théorie sur l'effet photoélectrique :
• Soit $h\nu_c = E_w$ ; le travail d'extraction qui est l'énergie minimale nécessaire pour libérer un électron de la surface du métal. $E_w = h\nu_c$ dépend uniquement de la nature de ce métal.

• Si $E = E_w$ ; c.à.d. si $h\nu = h\nu_c$ ou $\nu = \nu_c$, l'électron arrive à peine à quitter le métal sans aucune vitesse.

• Si $E > E_w$ ; c.à.d. si $\nu > \nu_c$, l'électron quitte le métal avec une certaine vitesse. La différence d'énergie $E - E_w$ donne à l'électron émis une énergie cinétique $E_c$. Ainsi $E_c = E - E_w = h\nu - h\nu_c$.
Plus $\nu$ augmente, plus $E_c$ augmente.

• Si $E < E_w$ ; c.à.d. si $\nu < \nu_c$, l'électron ne peut pas quitter le métal quelle que soit l'intensité lumineuse incidente.

• L'électron est émis instantanément dès que l'énergie du photon incident $E=h\nu \geq E_w$ (ou travail d'extraction) ; il n'existe aucun temps d'attente. Ainsi le travail d'extraction $E_w$ ne dépend pas de l'intensité lumineuse incidente, ni de la durée d'exposition à la lumière et ni de la d.d.p. entre l'anode et la cathode mais il dépend uniquement de la nature du métal éclairé.

# Enrichissons nos connaissances :

## Interprétation de l'effet photoélectrique :

• Pour déterminer la vitesse d'émission des photoélectrons, on rend négatif le potentiel de l'anode et ceci en reliant le pôle positif de la batterie à la cathode et le pôle négatif à l'anode.

• En variant la résistance du rhéostat, on peut varier cette d.d.p. négative jusqu'à annuler le passage du courant. A ce moment le champ électrique de l'anode exerce une répulsion suffisante sur les électrons pour leur permettre de juste l'atteindre.

• Cette d.d.p. négative notée $V_S$ est appelée « potentiel d'arrêt ». C'est la d.d.p. négative minimale qui empêche le passage du courant et où les photoélectrons émis par la cathode atteignent l'anode avec une énergie cinétique nulle.

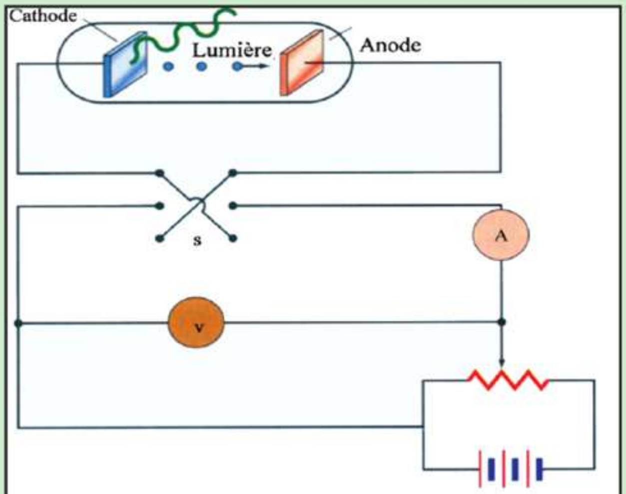



**Figure (12-18a)**
Circuit permettant d'étudier la relation entre l'intensité i du courant photoélectrique et la d.d.p. V

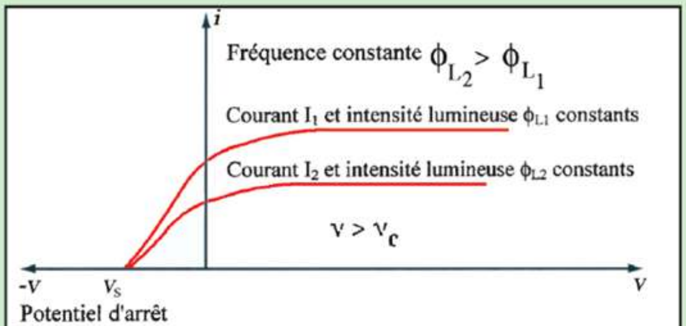



**Figure (12-18b)**
Relation entre i et V pour diverses intensités lumineuses

• Ainsi, en présence de $V_S$, les électrons sortent de la cathode avec une énergie cinétique maximale ($E_{c\ max}$) et elle diminue graduellement jusqu'à s'annuler lorsqu'ils arrivent à l'anode.

• En appliquant la loi de la conservation d'énergie, on a :

$E_{c\ max} = e\ V_S$

Ou $V_S = \frac{E_{c\ max}}{e}$ ; e étant la charge de l'électron

Ainsi par l'intermédiaire de $V_S$, on peut déterminer la valeur de $E_{c\ max}$.

• Dans ce cas, si un photon d'énergie $h\nu$ est incident sur la cathode, on a :

$h\nu = E_w + E_{c\ max}$ ou $E_{c\ max} = h\nu - E_w$.

Cette relation montre que $E_{c\ max}$ augmente avec l'augmentation de $h\nu$ quelle que soit l'intensité lumineuse $\varphi_L$ ou le nombre de photons incidents.

• Si $\nu = \nu_c$ on a $E_{c\ max} = h\nu_c - E_w = h\nu_c - h\nu_c = 0$ c.à.d. que les photoélect rons émis sortent de la cathode avec une vitesse nulle et ils n'ont pas besoin d'un potentiel d'arrêt pour annuler le courant (figure 12-19).

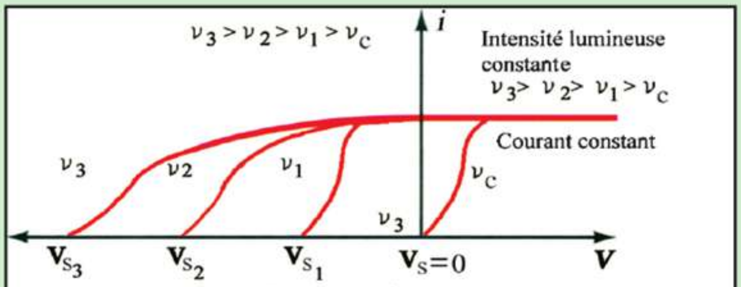



**Figure (12-19a)**
Mesure de $E_{c\ max}$ pour diverses valeurs de fréquences quand le nombre de photons incidents par seconde est constant.

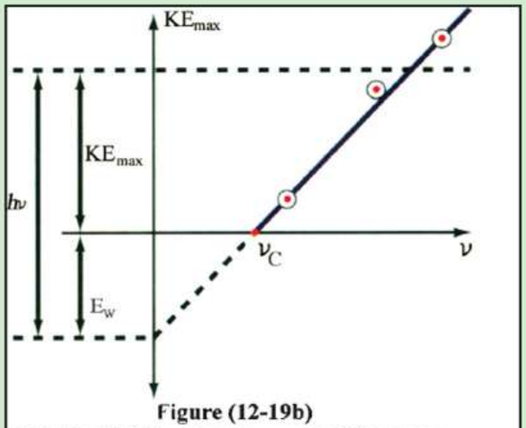



**Figure (12-19b)**
Relation linéaire entre $E_{C\ max}$ et la fréquence $\nu$.

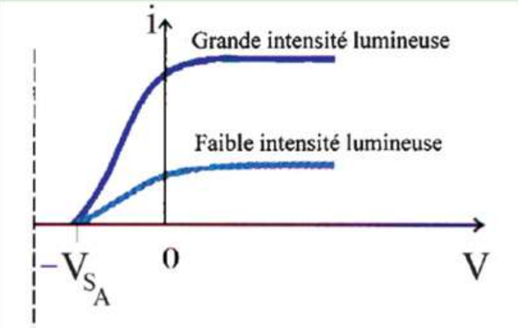



**Figure (12-20a)**
Relation entre le potentiel et le courant pour la matière (A)

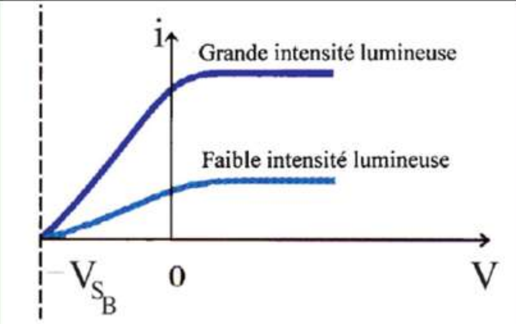



**Figure (12-20b)**
Relation entre le potentiel et le courant pour la matière (B)

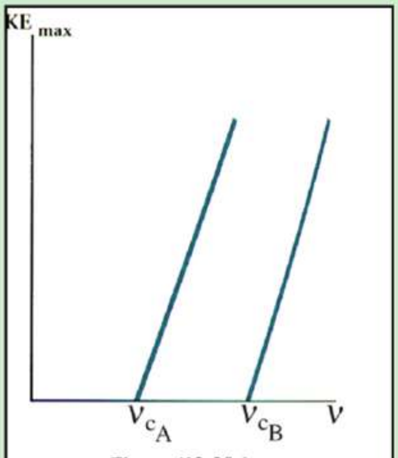



**Figure (12-20c)**
Relation entre $E_{c\,max}$ et la fréquence $\nu$ pour diverses matières

## Effet Compton :

• Le physicien Compton démontra par une expérience que lorsqu'un photon de grande énergie h$\nu$ (rayons X ou $\gamma$) est incident sur un électron libre, la fréquence du photon diminue et il change de direction (figure 12-21).

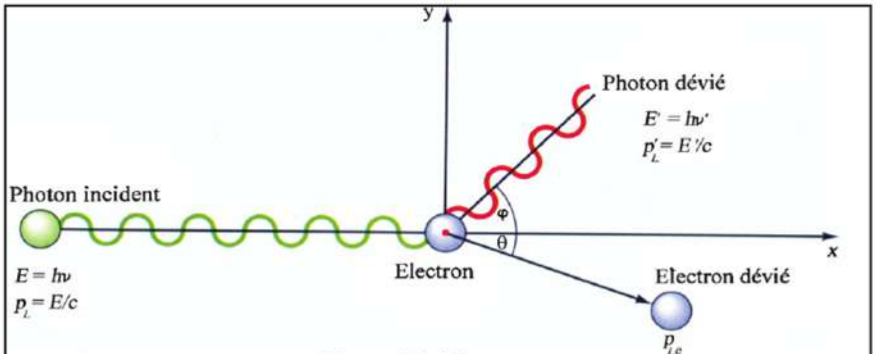



**Figure (12-21)**
Effet Compton

• Ce phénomène ne peut pas être interprété par la théorie ondulatoire classique mais il peut l'être par celle de Planck où toute radiation électromagnétique est formée de photons.

• Le choc d'un photon avec un électron est semblable à celui des boules d'un billard. Au cours du choc il y a conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie.
La somme de la quantité de mouvement du photon et celle l'électron avant le choc est égale à cette somme après le choc. Il en est de même pour la somme de leurs énergies.

• Le photon possède donc une quantité de mouvement, c.à.d. une masse et une vitesse. Il a donc une nature corpusculaire comme celle de l'électron.

## Propriétés du photon :

• Le photon est un quantum d'énergie concentrée dans un espace excessivement petit. Il a une masse et une quantité de mouvement. Son énergie E=h$\nu$.

• Il se déplace à la vitesse constante c de la lumière quelle que soit sa fréquence.

• D'après Einstein une perte de masse entraîne un dégagement d'énergie E liées par la relation $E = mc^2$. Ceci est le principe de la bombe atomique (figure 12-22).

**Figure (12-22)**
Bombe atomique

• La fission du noyau d'un atome est accompagnée par une faible perte de masse qui entraîne un dégagement d'énergie énorme car le nombre $c^2 = (3\times10^8)^2 = 9\times10^{16}$ ($m^2/s^2$) est excessivement grand.

• Ainsi la loi de conservation de la masse et celle de la conservation d'énergie peuvent être groupées en une seule loi qui est la « conservation de la masse et de l'énergie ».

• Un photon d'énergie $E = h\nu = mc^2$ possède pendant son mouvement une masse $m = \frac{h\nu}{c^2}$ et une quantité de mouvement $= m.c = \frac{h\nu}{c^2} \times c = \frac{h\nu}{c}$

• Si un faisceau de photons est incident sur une surface, de dimension d, au taux de $\varphi_L$ photons par seconde, chaque photon se réfléchit et il subit une variation de quantité de mouvement = 2.m.c.
La force engendrée sur la surface par les chocs de $\varphi_L$ photons/s est le taux de variation de leur quantité de mouvement.

Ainsi $F = 2.m.c.\varphi_L = 2\left(\frac{h\nu}{c^2}\right).c.\ \varphi_L = 2\left(\frac{h\nu}{c}\right).\ \varphi_L$

Ou $F = 2\times \frac{\text{Energie totale/seconde}}{c} = \frac{2P_w}{c}$, où $P_W$ est la puissance (en watt) du faisceau incident sur la surface.

• La force F étant excessivement petite, elle n'a aucun effet sur la surface si $d >> \lambda$.
• Cette force peut agir sur un électron dont la dimension $d < \lambda$ et dont la masse est excessivement faible ; elle peut donc le dévier. Ceci explique l'effet Compton.

• Si l'on veut interpréter ce qui se produit lorsque la longueur d'onde $\lambda$ de la lumière incidente est proche de la dimension d de l'obstacle (électron ou atome) ; il faut considérer la lumière d'après le « modèle microscopique » qui est celui du photon. Dans ce modèle, chaque photon est considéré individuellement comme une sphère de rayon $\lambda$ qui vibre à une fréquence $\nu$.

• Si $d >> \lambda$ ; il faut considérer la lumière d'après le « modèle macroscopique » qui est celui de tous les photons groupés ensemble (c.à.d. du rayon lumineux incident).
Dans ce modèle, le groupement des photons possède deux champs alternatifs ; l'un électrique et l'autre magnétique, perpendiculaires entre eux et perpendiculaires au sens de leur propagation.

• Ces deux modèles : macroscopique et microscopique sont liés. L'énergie lumineuse des rayons incidents est celle des photons qui les composent.

L'intensité lumineuse du rayon incident (mesurée par l'intensité du champ électrique ou du champ magnétique) est la mesure de la concentration des photons.

**Exemple :** ***Calculer la force exercée par un rayon de puissance 1 watt sur la surface d'un mur.***

**Solution :** $F = \frac{2P_w}{c} = \frac{2\times1}{3\times10^8} = 0,67\times10^{-8}$ N. Cette force est tellement faible qu'elle n'a aucun effet sur le mur.

---

## Enrichissons nos connaissances :

• La tomographie est une technique permettant de détecter les tumeurs à l'aide de l'image d'une section (ou d'une coupe) du patient. Cette image est obtenue en utilisant des ondes incidentes sur le patient, un détecteur et un ordinateur.

**1ère méthode :** (CTS où les ondes incidentes sont des rayons X « Computerized Tomography Scan ») (Figure 12-23)

• Le faisceau de rayons X traverse le corps du patient et va vers le détecteur qui prend toutes les informations concernant une certaine direction.

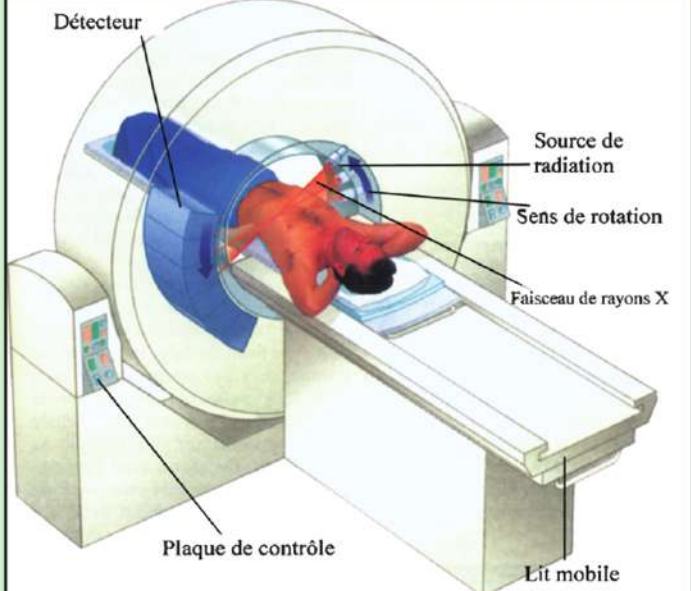



**Figure (12-23a)**
Appareil CTS

• On fait tourner la source de rayons X ainsi que le détecteur dans plusieurs directions et on prend à chaque fois les informations correspondantes.

• L'ordinateur rassembles toutes les informations prises dans les diverses directions et produit une seule image de cette coupe.

• On peut obtenir l'image d'une autre coupe par un déplacement de l'axe de rotation.

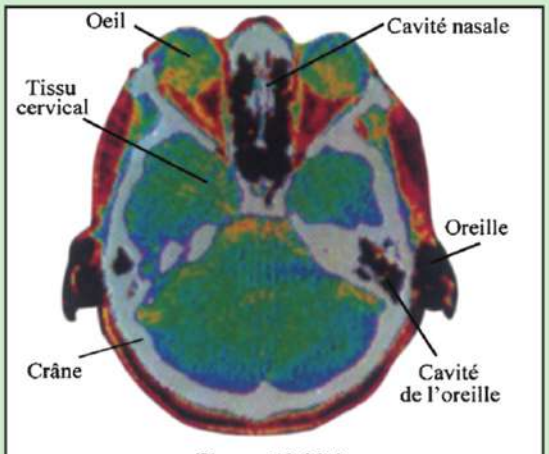



**Figure (12-23b)**
Image d'une coupe de la tête

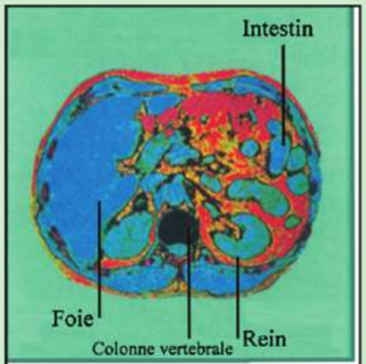



**Figure (12-23d)**
Coupe du ventre comprenant le foie, le rein et la colonne vertébrale

**Figure (12-23c)**
Image des vaisseaux sanguins en utilisant un colorant

**2ème méthode :** Imagerie par résonance magnétique (IRM) (Magnetic Resonance Imaging ).

• Cette technique permet de mieux distinguer les tumeurs et d'éviter les effets nocifs des rayons X.

• Le patient est placé sur un lit mobile est il est entouré d'un aimant très puissant fabriqué avec une matière supraconductrice. Le champ magnétique très intense de cet aimant ordonne le mouvement rotatif (spin) des noyaux d'hydrogène qui composent l'eau dans le corps humain (figure 12-24).

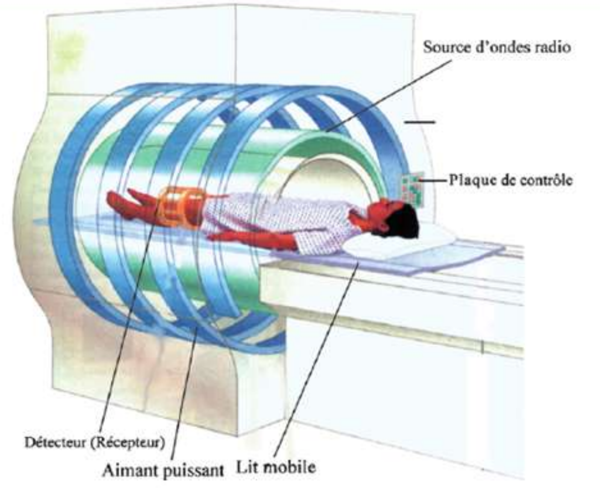



**Figure (12-24a)**
Appareil IRM

• Le détecteur (ou récepteur) est un autre aimant qui envoie les informations à un ordinateur qui les rassemble et qui reproduit une image de la coupe. Celui-ci indique les régions où l'eau est accumulée et permet ainsi de déterminer la zone où l a tumeur est présente.

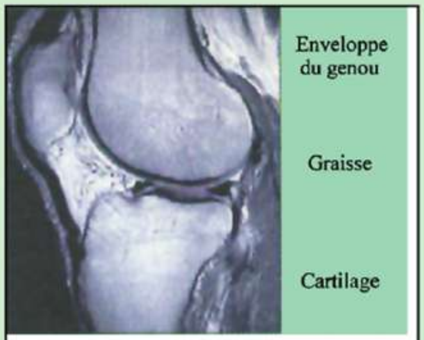



**Figure (12-24c)**
Image du genou

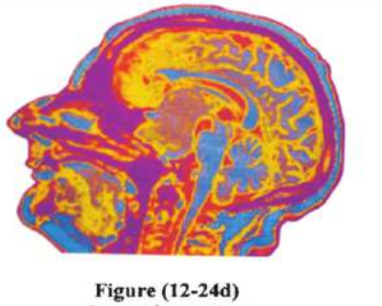


**Figure (12-24d)**
Image du cerveau

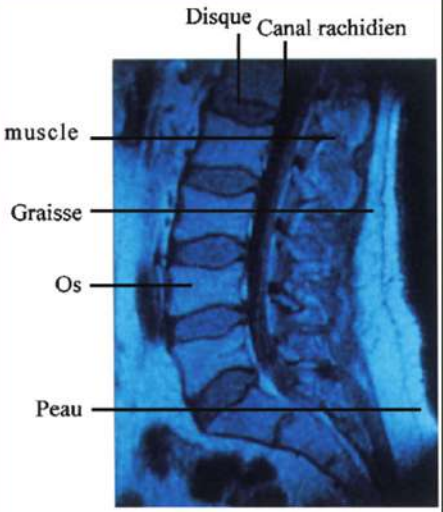



**Figure (12-24b)**
Image de la colonne vertébrale

## Relation entre la quantité de mouvement $p_L$ d'un photon et sa longueur d'onde λ :

• Nous savons que $\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{c}{\nu} \times \frac{h}{h}$ (où h est la constante de Planck)

Ainsi $\lambda = \frac{hc}{h\nu} = \frac{h}{h\nu/c} = \frac{h}{P_L}$ car $P_L = \frac{h\nu}{c}$ Donc $\boxed{\lambda = \frac{h}{P_L}}$ (12-3)

• Soit d la distance inter-atomique d'une surface et λ la longueur d'onde des photons incidents sur cette surface.

Si λ >> d, les photons agissent sur cette surface comme si elle était continue et ils se réfléchissent.

Si λ est proche de d, les photons peuvent traverser les espaces vides entre les atomes et ils subissent la diffraction. C'est ce qui se produit par exemple pour les rayons X.

### Exemple :

***Calculer la masse et la quantité de mouvement d'un photon de longueur d'onde λ = 380nm.***

**Solution:**

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3\times10^{8}(m/s)}{380\times10^{-9}(m)} = 7,89\times10^{14}\ Hz$$

$$m = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{(6,625\times10^{-34})\times(7,89\times10^{14})}{(3\times10^{8})^2} = 5,81\times10^{-36}\ kg$$

$$P_L = \frac{h}{\lambda} = \frac{6,625\times10^{-34}}{380\times10^{-9}} = 1,74\times10^{-24}\ kg.m/s$$

---

## La nature ondulatoire du corpuscule :

• Dans l'univers il existe plusieurs symétries. Puisque les ondes ont une nature corpusculaire, l'inverse est-il vrai. C.à.d. est-ce que les corpuscules ont une nature ondulatoire ? La réponse est oui. C'est la dualité (double nature) des ondes et des corpuscules. En 1923, De Broglie a établi qu'un corpuscule en mouvement est accompagné par une onde dont la longueur $\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{P_L}$ (12-14)

$P_L$ est la quantité de mouvement du corpuscule. Cette relation est identique à celle du photon.

• La dualité pour les ondes lumineuses signifie que celles-ci sont formées d'une énorme quantité de photons qui, groupés ensemble, ont toutes les propriétés des ondes : propagation, réflexion, réfraction, interférence et diffraction. L'intensité de l'onde exprime la concentration des photons. Le photon individuel a les

Caractères (héréditaires) qui caractérise nt l'onde : fréquence, longueur d'onde et vitesse.

• La dualité pour un faisceau d'électrons signifie que celui-ci est formé d'une énorme quantité d'électrons qui groupés ensemble ont une onde qui accompagne leur mouvement. L'électron individuel a les caractères (héréditaires) qui le caractérise : charge, masse, spin et quantité de mouvement.

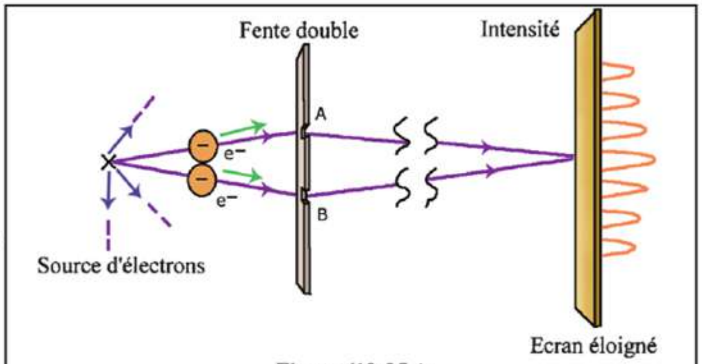



**Figure (12-25a)**
Diffraction des électrons à travers une fente double

• L'onde qui accompagne les électrons en mouvement a une longueur d'onde et une intensité qui dépend de la concentration des électrons. Cette onde a aussi toutes les propriétés des ondes lumineuses (figure 12-25). On peut donc utiliser un faisceau d'électrons comme un faisceau de lumière ; c'est ce qui a conduit à la découverte du microscope électronique.

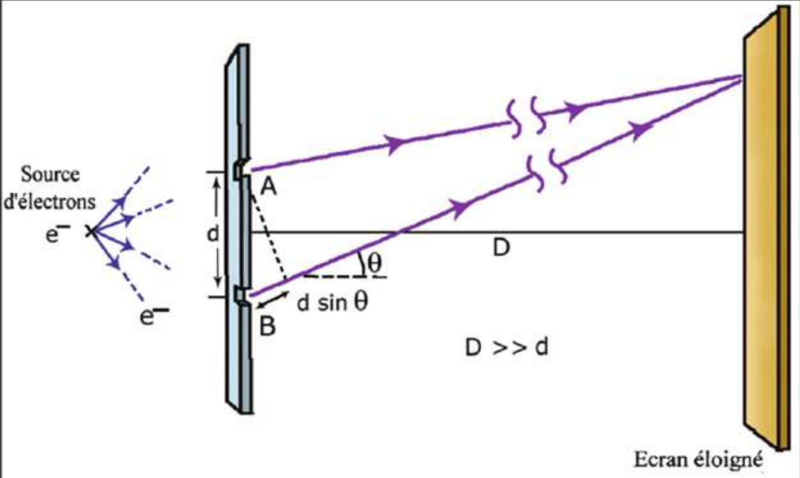



**Figure (12-25b)**
Calcul de la différence de marche de deux rayons sortant d'une fente double

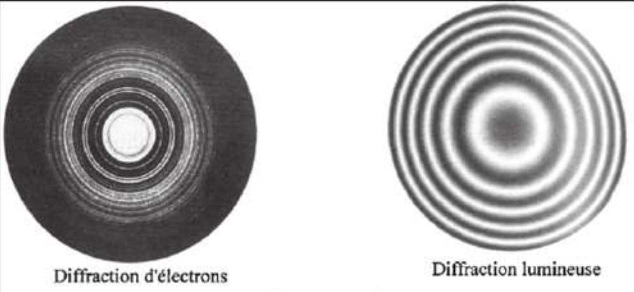



**Figure (12-25c)**

## Enrichissons nos connaissances :

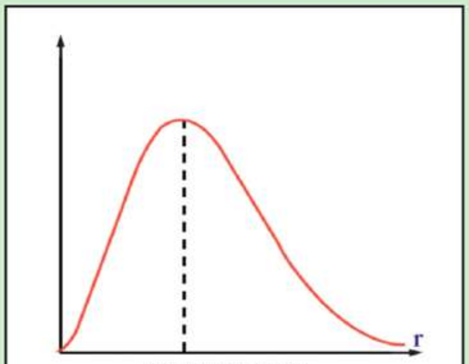



Figure (12-26a)
Fonction de probabilité de la présence d'un électron autour de son noyau

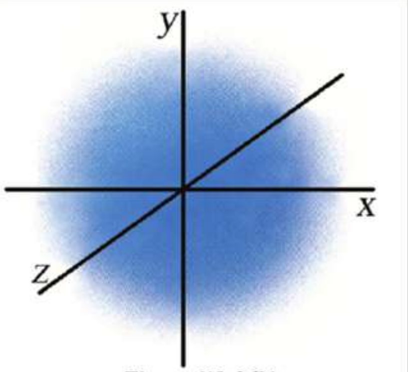



Figure (12-26b)
Nuage électronique sphérique

• L'onde qui accompagne le mouvement d'un électron n'est pas de nature électromagnétique mais sa nature est une probabilité qui a pour symbole $\Psi$ telle que $\Psi^2$ représente l a probabilité de la présence d'un électron à un endr oit quelconque.

• Heisenberg a démontré qu'il n'était pas possible de déterminer exactement la position d'un électron dans son atome. $\Psi^2$ représente la probabilité de sa présence en fonction de la distance qui le sépare du noyau (figure 12-26).

• La probabilité de sa présence sur le noyau = 0 (sans cela l'univers aurait disparu). La probabilité de sa présence à une grande distance du noyau = 0 (sans cela l'atome serait ionisé et cela ne peut se produire que sous l'action d'un agent extérieur.

• Ainsi l'énergie de l'électron à l'intérieur d'un atome est inférieure à l'énergie d'ionisation. Il reste ainsi emprisonné dans l'atome.

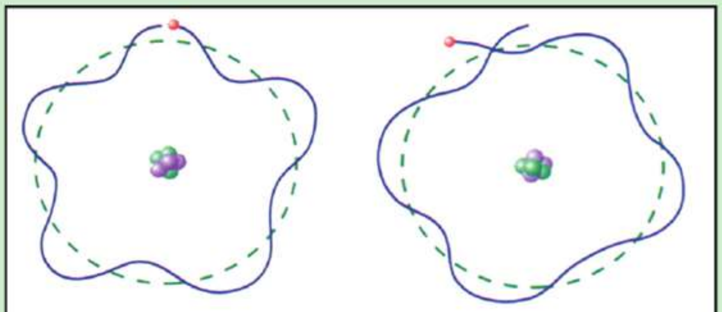


Figure (12-27a)
L'orbite est un multiple entier de la longueur d'une onde mobile dont le point de départ coïncide avec le point d'arrivée.

• Heisenberg a démontré qu'il n'est pas possible de décrire le mouvement d'un électron dans une orbite stable mais que l'on peut imaginer l'orbite comme étant l a région où sont formées les ondes stationnaires de la fonction Ψ (figure 12-27).

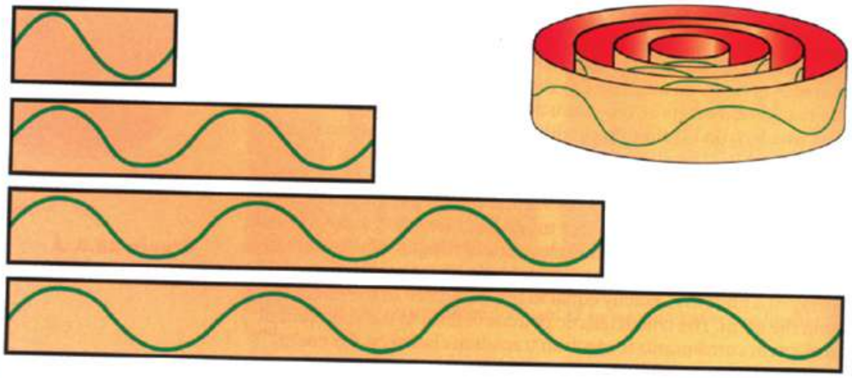


**Figure (12-27b)**
La longueur de l'orbite est un multiple entier de la longueur d'onde

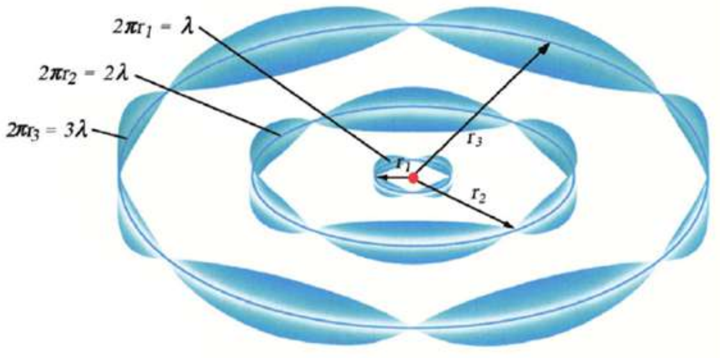



**Figure (12-27c)**
L'orbite est considérée comme une onde stationnaire

## Microscope électronique :

• Cet appareil est basé sur la nature ondulatoire des électrons. Il ressemble au microscope optique en beaucoup de points mais il diffère de celui-ci par son très grand pouvoir de résolution. Ceci est dû à la très grande énergie cinétique des électrons qui engendre ainsi des longueurs d'ondes très courtes (équation 2-3).

• Son très grand coefficient de grandissement lui permet d'examiner des objets très petits que le microscope optique ne peut pas observer.

• Le microscope optique utilise un faisceau de lumière visible tandis que l'autre utilise un faisceau d'électrons dont la longueur d'onde est 1000 fois plus petite que celle de la lumière visible.

• Le microscope électronique peut examiner tous les détails d'un très petit objet. Les lentilles utilisées sont des lentilles magnétiques qui concentrent le faisceau d'électrons.

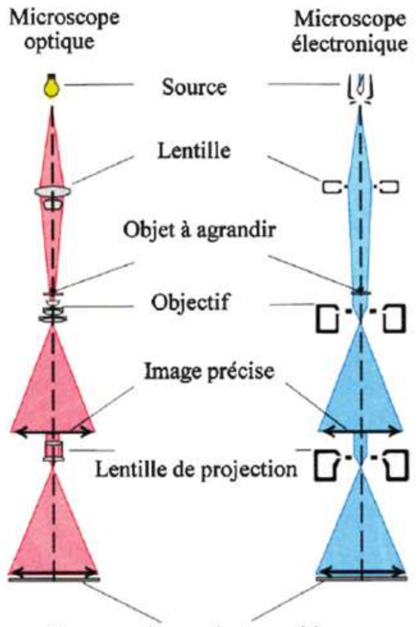



**Figure (12-28a)**
Microscope électronique

• Voici quelques ima ges obtenues par un micro scope électronique :

**Figure (12-28b)**
Image de la tête d'une mouche vue par un microscope électronique

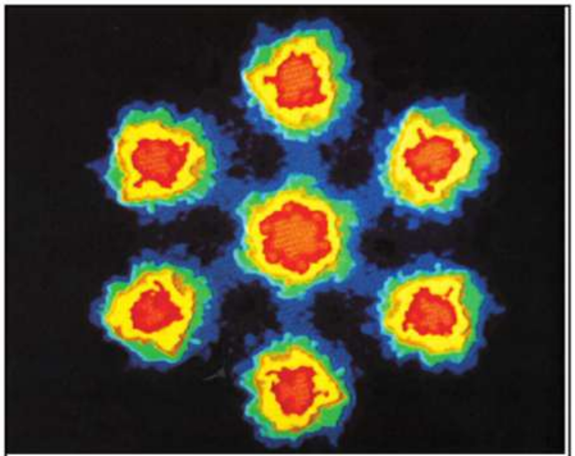


**Figure (12-28c)**
Image d'atomes d'uranium vue par un microscope électronique spécial

# Résumé

• La physique classique ne peut pas interpréter plusieurs phénomènes, en particulier ceux qui traitent de l'action de la lumière ou des radiations électromagnétiques sur les électrons et les atomes.

• La lumière ou les radiations électromagnétiques sont formées d'une énorme quantité de photons ayant chacun une énergie $E = h\nu$, où h est la constante de Planck et $\nu$ est la fréquence.

• Le phénomène photoélectrique prouve l'existence des photons.
Si la fréquence $\nu$ de la lumière incidente est supérieure à la fréquence limite $\nu_c$, l'intensité du courant photoélectrique dépend de l'intensité lumineuse incidente. Si $\nu < \nu_C$, le courant ne passe pas. L'énergie des photoélectrons émis dépend de la fréquence $\nu$ et non de l'intensité lumineuse incidente.

• Le photon a une masse, une quantité de mouvement, une vitesse qui est celle de la lumière et il occupe un espace qui est celui de la longueur d'onde. La force qu'il exerce, lorsqu'il est incident sur une surface quelconque, est très faible mais elle peut agir sur un électron libre à cause de sa très faible masse et de son très faible volume.

• L'effet Compton prouve la nature corpusculaire des photons qui ont une masse, une vitesse et une quantité de mouvement.

• L'onde décrit le comportement du groupement des photons.

• La longueur d'onde d'un photon est $\lambda = \frac{h}{P_L}$ où h est la constante de Planck et $P_L$ est la quantité de mouvement du photon. Cette même relation s'applique à un corpuscule libre où $\lambda$ est la longueur de l'onde qui accompagne le corpuscule.

• Le microscope électronique est une preuve de la relation de De Broglie sur les corpuscules. Ce microscope est utilisé pour examiner et voir des détails de très petites dimensions.

# Questions et exercices :

1. Calculer l'énergie, la masse et la quantité de mouvement d'un photon de longueur d'onde 700 nm.

(Réponse : $2{,}58\times10^{-19}$ J ; $0{,}29\times10^{-35}$ kg ; $0{,}86\times10^{-27}$ kg.m/s)

2. Calculer la masse d'un photon X de longueur d'onde 100 nm et celle d'un photon $\gamma$ de longueur d'onde 0,05 nm.

(Réponse : $m_X = 2{,}2\times10^{-35}$ kg ; $m_\gamma = 4{,}4\times10^{-33}$ kg)

3. Calculer la longueur d'onde d'une boule de masse 140 kg qui se déplace à la vitesse de 40 m/s ainsi que celle d'un électron se déplaçant à la même vitesse.

(Réponse : $\lambda = 1{,}88\times10^{-37}$ m ; $\lambda_e = 1{,}8\times10^{-5}$ m)

4. Une station de radio émet des ondes sur une fréquence de 94,2 MHz. Calculer l'énergie de l'un des photons émis. Trouver ensuite le nombre de photons émis par seconde sachant que la puissance de cette station est de 100 kW.

(Réponse : $E = 612{,}15\times10^{-28}$ J ; $n = 16{,}3\times10^{29}$)

5. Un électron libre ($e = 1{,}6\times10^{-19}$ C et $m = 9{,}1\times10^{-31}$ kg) est sous l'action d'une d.d.p. de 20 kV. En utilisant la loi de la conservation d'énergie, trouver sa vitesse à l'instant où il heurte l'anode. Calculer ensuite sa longueur d'onde et sa quantité de mouvement.

(Réponse : $v = 0{,}838\times10^{8}$ m/s ; $\lambda = 0{,}868\times10^{-11}$ m ; $P_L = 7{,}625\times10^{-23}$ kg.m/s)

6. Une distance minimale de 1 nm est observée par un microscope électronique. Calculer la vitesse de l'électron ainsi que le potentiel de l'anode.

(Réponse : $v = 0{,}728\times10^{6}$ m/s ; $V = 1{,}5$ V)

7. Dites pourquoi la théorie ondulatoire n'a pas pu expliquer l'effet photoélectrique. Comment Einstein a-t-il interprété les résultats expérimentaux de cet effet ?

8. Comment prouver la nature corpusculaire de la lumière à partir des radiations émises par un corps noir ?

9. Expliquer l'effet Compton et montrer comment il prouve la nature corpusculaire de la lumière.

10. Calculer la force agissant sur un corps de masse 10kg lorsqu'il est exposé à un rayon de puissance 100 kW. Qu'arrive-t-il si ce rayon est incident sur un électron et pourquoi ? (Réponse : $F = 0{,}67\times10^{-3}$ N)

# Introduction à la Physique Moderne

## Unité 2

# Chapitre 6 : Les spectres atomiques

# Chapitre 6

## Les spectres atomiques

### Introduction :

Le mot "atome" signifie en grec "l'unité indivisible". A partir d'expériences les savants on imaginé des modèles différents sur la structure de l'atome.

### C. L'atome de Bohr (19 13)

Bohr

(1) Il existe au centre de l'atome un noyau positivement chargé.

(2) Les électrons négatifs tournent autour du noyau dans des orbites déterminées appelées enveloppes qui correspondent chacune à un certain niveau d'énergie. L'électron n'émet aucune radiation tant qu'il se déplace dans le même niveau d'énergie.

(3) L'atome est électriquement neutre. La charge négative des électrons est égale à la charge positive du noyau.

Il ajouta ensuite ces trois autres hypothèses qui sont d'une grande importance :

(1) Si un électron passe d'une orbite extérieure $E_2$ à une autre intérieure $E_1$ ($E_2 > E_1$) ; l'électron émet une radiation (photon) d'énergie $h\nu = E_2 - E_1$ où $\nu$ est la fréquence de la radiation émise.

(2) Les forces électriques de Coulomb et les forces mécaniques de Newton sont applicables à l'atome.

(3) On peut calculer le rayon (r) de l'orbite en considérant que l'onde qui accompagne l'électron est stationnaire de la relation $n\lambda = 2\pi r$ (calculer le rayon de l'orbite pour n=1,2,3,…)

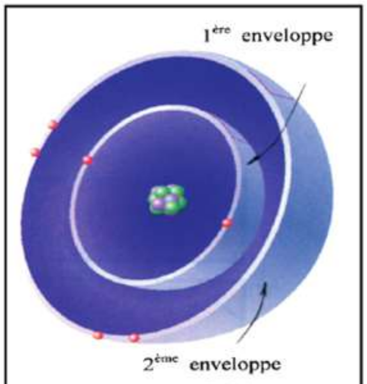



**Figure (13-5a)**
Modèle de Bohr

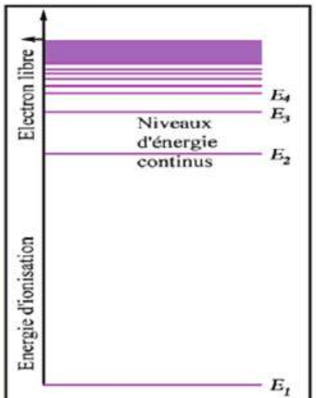



**Figure (13-5b)**
Niveaux d'énergie d'un atome

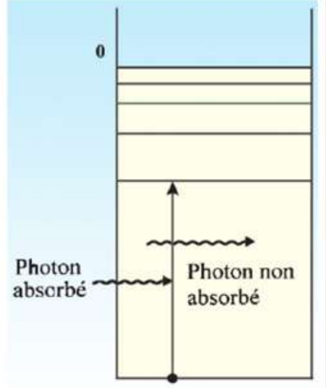



**Figure (13-5c)**
Absorption d'un photon

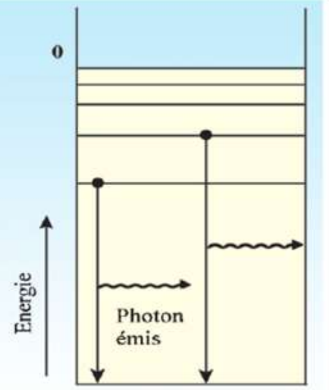



**Figure (13-5d)**
Emission d'un photon

## Emission de la lumière par l'atome de Bohr (Raies spectrales de l'hydrogène) :

1- Lorsqu'on fournit de l'énergie aux atomes d'hydrogène, ceux-ci sont excités à des degrés différents. Les électrons des divers atomes vont transiter du niveau K (n=1) à des niveaux supérieurs différents (n=2 ou n=3 ou n=4 .... )

2- L'energie d'un niveau dans l'atome de l'hydrogene $E_n = \frac{13.6}{n^2}$ ev l'énergie en joule = l'énergie en ev.x la charge de l'électron.

$1ev = 1.6 \times 10^{-19} J$

3- Les électrons ne peuvent rester dans les niveaux d'énergie supérieurs que pour une durée excessivement faible ($10^{-8}$ seconde), ils descendent ensuite aux niveaux d'énergie inférieurs.

4- Lorsque l'électron transite d'un niveau d'énergie supérieur $E_2$ vers un niveau d'énergie inférieur $E_1$, il perd cette différence d'énergie sous forme d'une radiation d'énergie $h\nu = E_2 - E_1$ où $\nu$ est sa fréquence et dont la longueur d'onde $\lambda = \frac{c}{\nu}$.

5- Les raies spectrales émises par l'atome d'hydrogène sont formées de cinq séries. Chaque raie corresp ond à une énergie et à une fréquence déterminées (figur e 13-8).

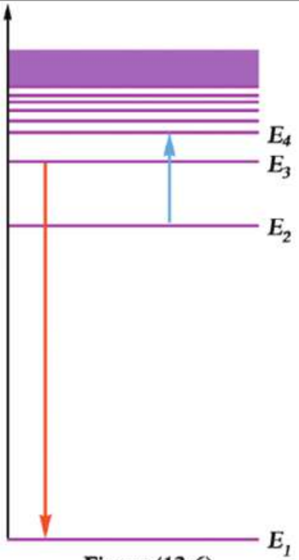



**Figure (13-6)**
Transition des électrons entre les niveaux d'énergie



Al-Ashraaf printing house

## Séries des raies spectrales de l'hydrogène :

1- Série de Lyman où l'électron passe des niveaux d'énergie supérieurs au niveau K(n=1). Cette série produit des raies spectrales qui se trouvent dans la région des rayons ultraviolets (courtes longueurs d'onde et hautes fréquences).

2- Série de Balmer où l'électron passe des niveaux d'énergie supérieurs au niveau L(n=2). Elle produit des raies spectrales dans la région du spectre visible.

3- Série de Paschen où l'électron passe des niveaux d'énergie supérieurs au niveau M(n=3). Elle produit des raies spectrales dans la région des rayons infrarouges.

4- Série de Brackett où l'électron passe des niveaux d'énergie supérieurs au niveau N(n=4). Elle produit des raies spectrales dans la région des rayons infrarouges.

5- Série de Pfund où l'électron passe des niveaux d'énergie supérieurs au niveau O(n=5). Elle produit des raies spectrales qui se trouvent à l'extrême limite des rayons infrarouges, qui ont la plus grande longueur d'o nde et la plus petite fréquence.

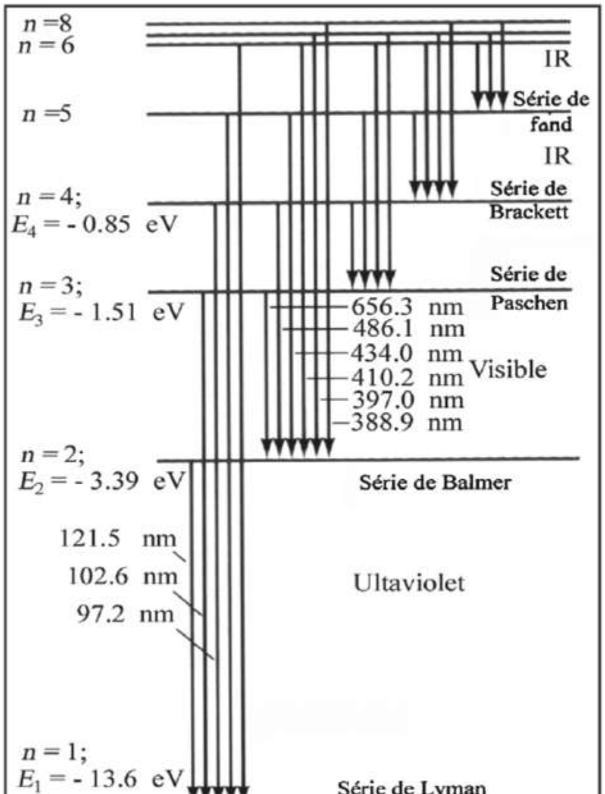



**Figure (13-8a)**
Séries spectrales de l'hydrogène

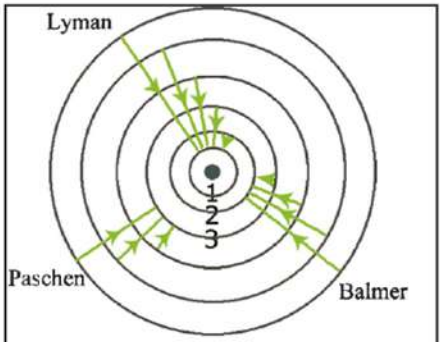



**Figure (13-8b)**
Séries des raies spectrales de l'hydrogène

## Moyen d'obtenir un spectre pur :

On utilise pour cela un appareil appelé spectromètre figure (13-9) qui est formé de trois parties essentielles.

1- Une source de rayons :

Une source lumineuse est placée devant une fente rectangulaire étroite dont on peut contrôler l'ouverture à l'aide d'une vis. Cette fente se trouve au foyer d'une lentille convexe.

2- Un prisme triangulaire en verre placé sur une table tournante.

3- Un télescope formé de deux le ntilles convexes qui sont l'objectif et l'oculaire.

Plaçons devant la fente rectangulaire étroite une source de lumière blanche très intense dont les rayons sont incidents sur le prisme en position de déviation minimale et ajustons le télescope pour recevoir les rayons émergents du prisme.

**Figure (13-9a)**
Schéma du spectromètre

Nous constatons que la lumière se disperse. Les rayons de chaque couleur sont parallèles entre eux mais ils ne sont pas parallèles aux autres couleurs. L'objectif converge les rayons de chaque couleur en un foyer propre à celui-ci. L'oculaire permet d'observer les différ entes couleurs bien délimitées. On obtient ainsi un spectre pur.

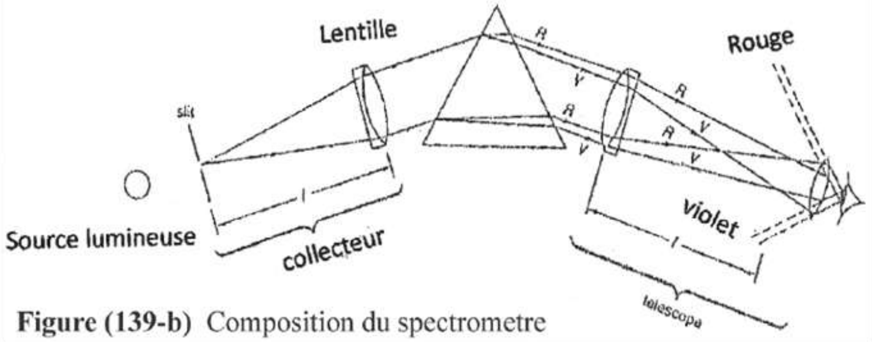



**Figure (139-b)** Composition du spectrometre

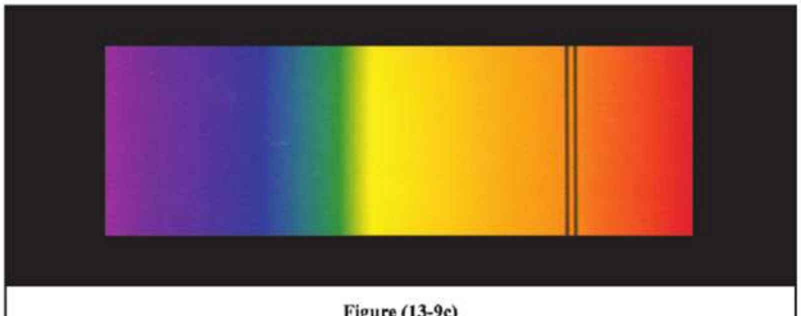


**Figure (13-9c)**
Spectromètre utilisé pour déterminer la température d'une étoile et la nature des gaz qu'elle contient

**Nous pouvons obtenir plusieurs genres de spectre pour les matières dont les atomes sont excités**

(1) Un spectre continu : formé d'une infinité de longueurs d'onde et de fréquences. C'est le cas d'une source de lumière blanche de haute température.

(2) Un spectre de raies : formé de quelques longueurs d'onde ou de fréquences. Il est discontinu.

(3) Un spectre d'émission : qui se produit lorsque les atomes d'un élément excité passe d'un niveau d'énergie supérieur à un autre inférieur.

(4) Un spectr e d'absorption : formé de quelques raies noires sur un fond brillant et coloré. Il est obtenu lorsque les rayons émis par une source de lumière blanche de haute température traversent un gaz dont les atomes sont excités. Les longueurs d'ondes caractéristiques de ce gaz disparaissent (elles sont absorbées). Celle-ci sont les mêmes que celle du spectre d'émission de ce gaz figure (13-10).

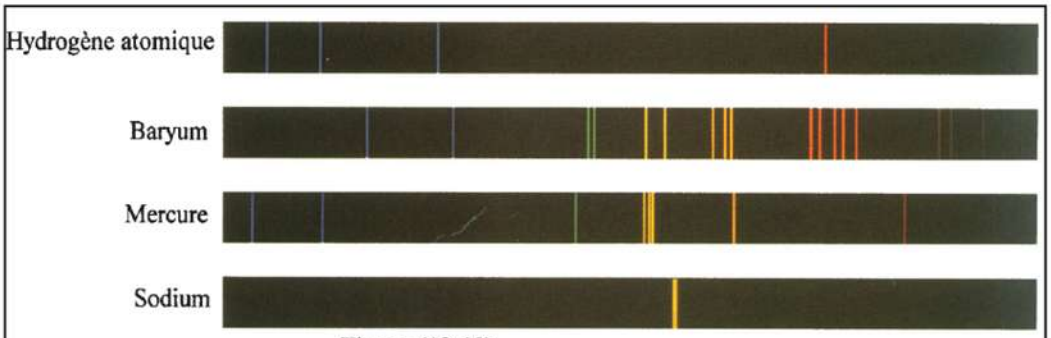



**Figure (13-10)**
Spectre d'absorption de quelques éléments

Les raies de Fraunhofer sont les raies noires d'absorption des éléments qui se trouvent dans la couche externe du soleil. A l'aide de ces raies, Fraunhofe r a pu déterminer les éléments qui se trouvent dans cette couche qui est principalement formée d'hydrogène et d'hélium.

**Fraunhofer**

## Rayon X :

### Que sont ces rayons ?

• Ceux-ci sont des ondes électromagnétiques, invisibles, de très courtes longueurs d'onde (qui varie de $10^{-8}$ m à $10^{-13}$ m) qui sont comprises entre celles des rayons ultraviolets et des rayons $\gamma$.
Elles ont une grande énergie à cause de leurs hautes fréquences.

• Le premier qui les a découverts est "Röentgen", qui, ne connaissant pas leur nature, les a appelés rayons inconnus ou rayons X.

### Propriétés des rayons X :

1- Un grand pouvoir de pénétration à travers la matière.
2- Un grand pouvoir d'ionisation des gaz.
3- Ils se diffractent dans les cristaux.
4- Ils impressionnent les plaques photographiques.

### Production des rayons X par le tube de "Coolidge" :

• Le filament chauffé émet des électrons qui se dirigent vers la cible sous l'effet du champ électrique intense engendré par la grande d.d.p. entre la cible et le filament.

• Les électrons émis possèdent ainsi une très grande énergie cinétique dont la valeur dépend de la d.d.p. appliquée entre la cible et le filament.

• Lorsque les électrons heurtent la cible (en tungstène ou autre métal), ils perdent une partie ou toute leur énergie en produisant les rayons X (figure 13-11).

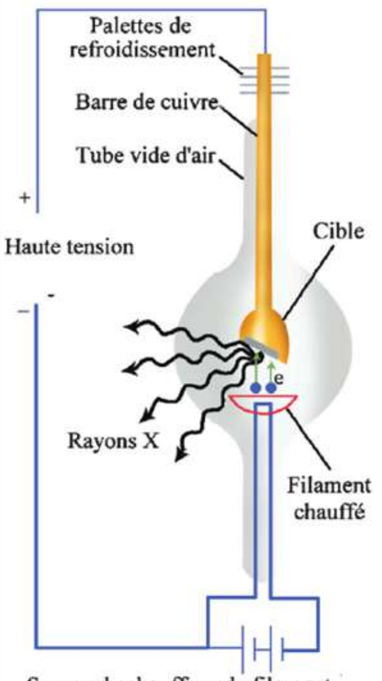


**Figure (13-11)**
Tube de Coolidge

### Spectre des rayons X :

En analysant le faisceau des rayons X émis par la cible pour étudier les longueurs d'ondes obtenues, on constate que leur spectre est formé de deux composantes :

a) Un spectre de raies formé de quelques longueurs d'ondes caractéristiques de l'élément utilisé dans la cible.
b) Un spectre continu formé d'une infinité de longueurs d'ondes dans la région des rayons X. Ce spectre ne dépend pas de la nature de la matière.

## Interprétation du mécanisme d'émission des rayons X :

### A. Spectre de raies caractéristiques :

• Ce spectre se produit lorsque l'électron incident heurte l'un des électrons proche du noyau de l'atome de la cible. L'électron heurte ayant acquis une grande énergie, peut alors sauter vers un niveau d'énergie supérieure ou quitter l'atome.

• Un autre électron venant d'un niveau d'énergie supérieur descend au niveau inférieur pour remplacer le vide créé par l'électron heurte.

• Cette descente entre les deux niveaux est accompagnée d'une émission de rayons ayant une longueur d'onde bien déterminée.

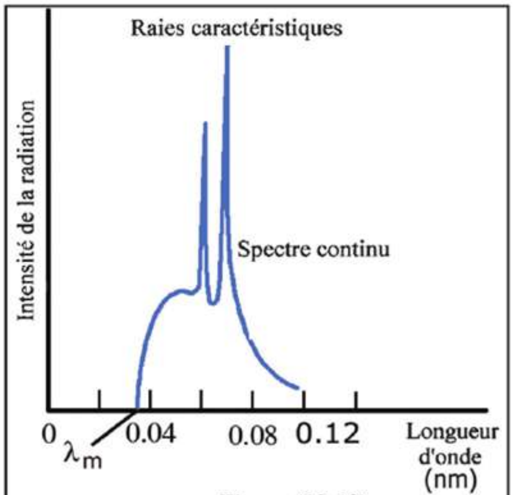



**Figure (13-12)**
Spectre continu et spectre de raies

• On constate que :

1- Le spectre de raies caractéristiques ne dépend pas de la d.d.p. utilisée mais qu'il dépend de la nature de l'élément formant la cible. Plus le nombre atomique de cet élément augmente, plus la longueur d'onde des raies caractéristiques diminue.

2- Si la d.d.p. entre la cible et le filament est faible, les raies caractéristiques peuvent ne pas apparaître.

3- On peut calculer la longueur d'onde de ces raies (appelés rayons X durs) par la formule : $\Delta E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$

### B. Spectre continu :

• Ce spectre se produit par la décélération des électrons incidents lorsqu'ils s'approchent des électrons se trouvant dans les atomes de la cible.

• L'énergie des électrons incidents diminue soit par freinage, soit par chocs. Cette perte d'énergie entraîne une émission de radiations électromagnétiques (rayons X) selon la théorie de Maxwell.

• La perte d'énergie des électrons incidents peut prendre une infinité de valeurs, c'est pourquoi les radiations émises peuvent avoir une infinité de longueurs d'ondes. C'est pourquoi ce spectre est dit "continu".

• Les rayons X du spectre continu sont appelés "rayons mous" ou rayons obtenus par "freinage".

## Applications im  portantes des rayons X :

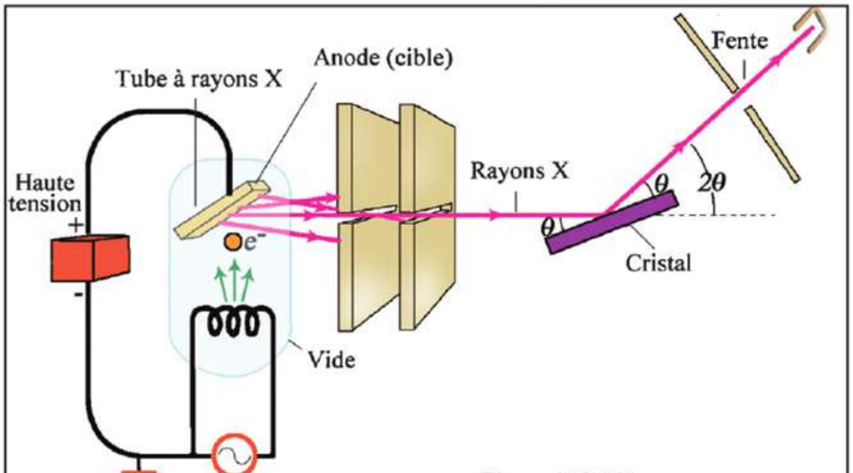



**Figure (13-13)**
Utilisation des rayons X pour l'étude des cristaux

1. L'une des propriétés importantes des rayons X est qu'ils se diffractent lorsqu'ils traversent un cristal ce qui permet d'étudier sa structure (figure 13-13). Une interférence se produit entre les ondes traversant les espaces inter atomiques qui se comportent comme de multiples orifices très proches l'un de l'autre; comme ce qui se produit dans l'expérience des fentes de Young.
Le cristal agit comme un "réseau de diffraction" et on voit apparaître des franges claires et sombres selon la d ifférence de marche des ondes qui interfèrent.

2. On utilise leur grand pouvoir de pénétration à travers la matière pour détecter les défauts dans la structure des métaux utilisés dans l'industrie.

3. Leur grand pouvoir de pénétration et leur capacité à impressionner les plaques photographiques permettent en médecine de détecter les fractures des os ou leurs fêlures ainsi que certaines maladies (figure 13-14).

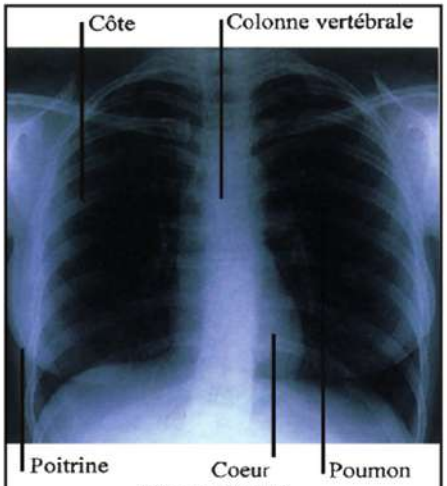



**Figure (13-14)**
Photo des poumons par rayons X

# Résumé

- Hypothèses de Bohr et son modèle de l'atome d'hydrogène.

- Lorsqu'un électron passe d'un niveau d'énergie supérieur $E_2$ à un autre inférieur $E_1$ il émet une radiation de fréquence $\nu$ et d'énergie $h\nu$ telle que $h\nu = E_2 - E_1$

- Les raies spectrales de l'atome d'hydrogène sont groupées en cinq séries. Chacune de ces raies correspond à une énergie déterminée et par suite à une fréquence et à une longueur d'onde déterminées.
La série de Lyman est dans la région des rayons ultraviolets.
La série de Balmer est dans la région du spectre visible.
La série de Paschen est dans la région des rayons infrarouges.
La série de Brackett est dans la région des rayons infrarouges.
La série de Pfund se trouve à la limite de la région des rayons infrarouges.

- Le spectromètre est un appareil permettant d'analyser les composantes visibles et invisibles de la lumière émise par les atomes d'un élément excité.

- Les rayons X découvert par Röentgen en 1895 sont des rayons invisibles de très courte longueur d'onde. Ne connaissant pas leur nature, Röntgen les appela rayons inconnus ou rayons X.

- La diffraction des rayons X permet d'étudier la structure des cristaux solides. Ces rayons sont aussi utilisés dans l'industrie et en médecine.

## Questions et exercices

1- Comment Bohr a-t-il pu interpréter le spectre émis par l'atome d'hydrogène ?

2- Sur quelle base a-t-on divisé le spectre de l'atome d'hydrogène en cinq séries?

3- **Justifier** :
Dans le spectre de l'atome d'hydrogène, la série de Lyman est celle qui a la plus grande énergie alors que celle de Pfund à la plus faible énergie.

4- **Définir** :
Le spectre de raies – Le spectre continu – Le spectre d'absorption – Le spectre d'émission.

5- Expliquer comment le spectromètre permet d'obtenir un spectre pur.

6- Montrer, par un schéma complètement annoté, les différentes parties du tube de Coolidge qui produit les rayons X.

7- Comparer le spectre caractéristique au spectre continu des rayons X.

8- Expliquer comment se produit le spectre de raies caractéristiques et le spectre continu des rayons X. Comparer ensuite ces deux spectres.

9- Citer quelques applications pratiques des rayons X.

## Introduction à la Physique Moderne

## Unité 2

# Chapitre 6 : Le LASER

## Chapitre 7

# Le LASER

## Introduction :

• La découverte du rayon laser a eu une énorme influence sur les sciences de notre époque par ses innombrables applications dans le domaine des sciences fondamentales : physique (l'optique en particulier), chimie, ingénierie et télécommunication.

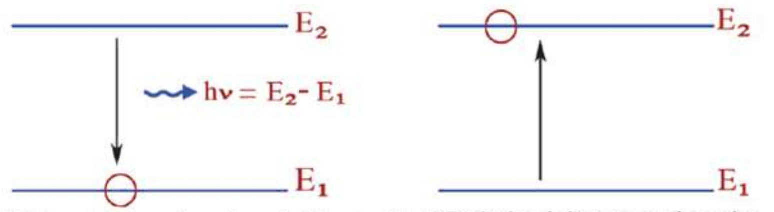
• Le mot laser est l'abréviation de : **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation.

• En 1960 le savant américain Maiman a fabriqué le premier générateur de rayons laser en utilisant un cristal de rubis dopé par du chrome. Quelques mois plus tard on fabriqua le laser à gaz (hélium-néon) et plus tard, divers générateurs de ces rayons.

## Emission spontanée et émission stimulée :

• Nous savons que l'atome possède des niveaux d'énergie dont le plus bas $E_1$ est le niveau fondamental. Les autres niveaux d'énergie supérieurs $E_2$, $E_3$, $E_4$, … sont ceux où l'atome est excité (niveaux d'excitation).

• Si un photon d'énergie $E_2$-$E_1$ est incident sur un atome se trouvant au niveau $E_1$, celui-ci absorbe le photon et passe au niveau d'excitation $E_2$. Après un temps très court (environ $10^{-8}$ seconde) appelé "durée de vie", l'atome retourne au niveau $E_1$ en émettant un photon d'énergie $E_2$-$E_1$ (figure 14-1). Ceci est "l'émission spontanée" qui caractérise toutes les sources de lumière ordinaire où le photon incident et le photon émis ont la même fréquence mais ils ne sont pas en phase et n'ont pas le même sens.




b) Retour de l'atome à un niveau inférieur après la fin de la durée de vie et l'émission d'énergie

a) Excitation de l'atome par absorption d'une énergie extérieure

**Figure (14-1)**
Emission spontanée

• En 1917, Einstein a découvert un autre genre d'émission appelée "émission stimulée" qui caractérise toutes les sources laser.

• L'émission stimulée se produit lorsque un atome excité au niveau $E_2$ (dont la durée de vie ne s'est pas terminée) est traversé par un photon d'énergie $E_2$-$E_1$. Le photon incident stimule (pousse) l'atome à émettre un nouveau photon qui s'ajoute au premier.
Le photon incident et le photon émis ont mêmes fréquences, phase et sens. Après cette émission l'atome retourne au ni veau fondamental $E_1$ (figure 14-2).

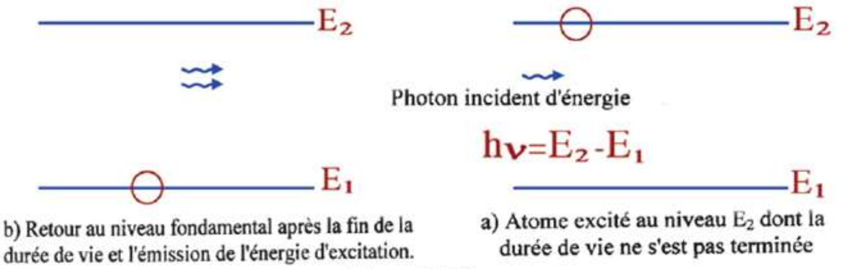



**Figure (14-2)**
Emission stimulée

• L'émission stimulée produit des photons cohérents qui se déplacent sous forme de rayons qui restent parallèles sur de très grandes distances. La très grande concentration de ces rayons fait qu'ils sont très peu divergents, ainsi leur intensité ne faiblit pas avec l'augmentation de la distance comme ce qui se produit avec les sources de lumière ordinaires.

• Le tableau de comparaison suivant montre les propriétés de chaque type d'émission.

| | Emission spontanée | Emission stimulée |
|---|---|---|
| 1 | Elle se produit lorsque les atomes excités passent d'un niveau d'énergie supérieur à un autre inférieur en émettant spontanément cette différence d'énergie sous forme de photons sans aucune action extérieure et après la fin de la durée de vie de l'atome excité. | Elle se produit lorsque les atomes excités passent d'un niveau d'énergie supérieur à un autre inférieur en émettant cette différence d'énergie sous forme de photons, sous l'action de photons extérieurs, de même énergie que celle des photons émis et avant la fin de la durée de vie des atomes excités. |
| 2 | Les photons émis ont diverses longueurs d'ondes qui comprennent une grande partie du spectre visible. | Les photons émis ont tous la même longueur d'onde. C'est une lumière monochromatique. |
| 3 | Les photons émis se déplacent dans toutes les directions d'une manière aléatoire. | Les photons émis sont en phase et ils se déplacent dans le même sens sous forme de rayons parallèles. |
| 4 | La concentration des photons diminue avec l'augmentation de la distance à cause de la divergence des rayons. L'intensité de ces rayons est inversement proportionnelle au carré de la distance qu'ils parcourent (loi de l'inverse carré). | La concentration des rayons reste constante sur une très grande distance. Ils ne subissent pas la loi de l'inverse carré. (Il a été possible d'envoyer des rayons lasers de la terre à la lune puis de le recevoir à nouveau sur la terre sans grande divergence malgré l'énorme distance parcourue) |
| 5 | C'est l'émission prédominante dans les sources de lumière ordinaire. | C'est l'émission prédominante dans les sources de lumière laser. |

## Propriétés du rayon laser :

### 1- Pureté spectrale (Mono chromaticité) :

• Chaque raie spectrale obtenue par une source de lumière ordinaire contient une grande variété de longueurs d'onde pour une certaine couleur dont l'intensité diffère d'une longueur d'onde à une autre. (Chaque couleur a des tons différents (figure 14-3a)).

• Les sources lasers produisent une seule raie spectrale contenant une très faible variété de longueurs d'ondes dont l'une d'elles à la plus grande intensité. La lumière obtenue est mono chromatique (très pure). (Fig ure 14-3b)

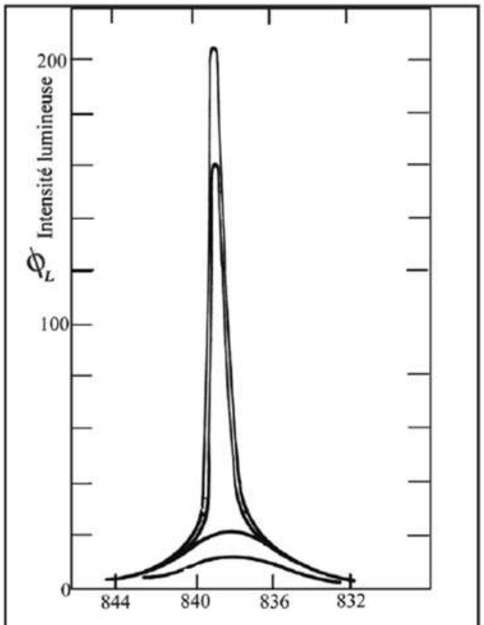


**Figure (14-3b)**
Largeur d'une raie spectrale d'une source laser.

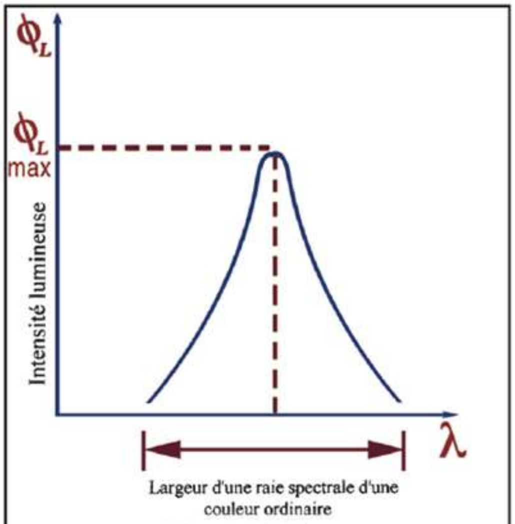


**Figure (14-3a)**
Largeur d'une raie spectrale de lumière ordinaire

### 2- Directivité du faisceau laser :

• Dans les sources de lumière ordinaires, le diamètre du faisceau augmente pendant sa propagation à cause de la divergence des rayons (figure 14-4a).

• Dans les sources lasers, le diamètre du faisceau reste contant sur une très grande distance car les rayons sont parallèles et très peu divergents. Ainsi l'énergie est transportée, sans perte, sur une grande distance.

## 3- Cohérence :

• Les photons de la lumière ordinaire sont incohérents. Ils ne sont pas tous émis au même instant dans le même sens et ils ne sont pas en phase.

• Les photons émis par la source laser sont cohérents. Ils sont tous émis au même instant dans le même sens et ils sont en phase. Ceci augmente leur intensité et leur concentration (figure 14-5).

## 4- Intensité :

• Les rayons émis par une source lumineuse ordinaire sont soumis à la loi de l'inverse carré. C.à.d. que l'intensité lumineuse incidente sur l'unité de surface diminue plus on s'éloigne de la source. Ceci est dû à la divergence et à l'incohérence des photons.

• L'intensité des rayons lasers est constante sur l'unité de surface et elle n'est pas soumise à la loi de l'inverse carr é.

## Principe de fonctionnement du laser :

• Pour obtenir un effet laser, il faut que les atomes de la matière efficace atteignent l'état de "l'inversion de population" où le nombre d'atomes excités aux niveaux d'énergie supérieurs est plus grand que ceux qui se trouvent aux niveaux inférieurs. Ainsi le nombre de photons émis par l'émission stimulée est prédominant.

• L'émission stimulée est amplifiée pendant les trajets aller-retour des photons dans la matière efficace par de multiples réflexions entre deux miroirs. Ces photons stimulent d'autres atomes et produisent d'autres photons qui s'ajoutent. Le rayon est ainsi amplifié très fortement par de multiples émissions stimulées.

## Eléments fondamentaux du laser :

Quelles que soient les dimensions, la forme ou l'énergie des appareils produisant les rayons lasers, ceux-ci doivent être formés de trois éléments essentiels :

1. Un milieu efficace qui est la matière efficace produisant le laser. Ce milieu peut être soit :

• Un cristal solide de rubis artificiel ou de silicium (semi conducteur).
• Un liquide colorant (matière organique colorante dissoute dans l'eau).
• Des atomes gazeux : mélange de hélium-néon ou l'argon ionisé.
• Des molécules de gaz : dioxyde de carbone.

2. Une source d'énergie pour transmettre l'énergie aux atomes ou aux ions de la matière efficace afin de les exciter pour produire le rayon laser. Cette excitation peut être obtenue par :

a) Une source électrique ; soit en utilisant un générateur d'onde radio soit une décharge électrique dans un gaz sous une grande d.d.p. continue. Celle-ci est utilisée dans les lasers à gaz comme le laser au dioxyde de carbone, le laser hélium-néon et le laser à argon.

b) Une source lumineuse qui produit l'excitation par "pompage optique" et qui peut être effectuée par deux méthodes "

- Une lampe à flash de grande puissance utilisée dans le laser à rubis.
- Un rayon laser utilisé dans le laser à colorants liquides.

c) Une source calorifique où l'on utilise l'effet calorifique résultant de la pression cinétique des gaz pour exciter les molécules de la matière efficace.

d) Une source chimique où l'on utilise l'énergie résultante des réactions chimiques pour exciter les molécules de la matière efficace. La réaction entre l'hydrogène et le fluor ou celle entre le fluorure d'hydrogène et le dioxyde de carbone sont des exemples de ce genre de réaction qui excite les molécules du gaz.

3- Une cavité résonnante qui est la partie contenant et permettant l'amplification de la lumière. Elle peut prendre deux formes :

a) Une cavité résonante externe sous forme de deux miroirs parallèles contenant entre eux la matière efficace. Les multiples réflexions sur ces deux miroirs produisent l'amplification dans les lasers à gaz (figure 14-7a).

**Figure (14-7a)**
Cavité résonante externe

b) Une cavité résonante interne où les extrémités de la matière efficace sont enduites d'une matière réfléchissante qui agit comme deux miroirs dont l'un d'eux est semi transparent pour permettre le passage d'une partie des rayons vers l'extérieur. Cette cavité est utilisée dans les lasers solides comme le laser à r ubis (figure 14-7b).

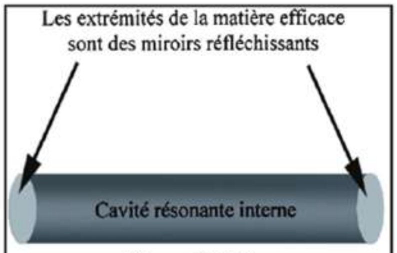



**Figure (14-7b)**

Les figures (14-8) montrent les étapes permettant d'obtenir le rayon laser.

**Figure (14-8a)**
Emission stimulée par un photon extérieur

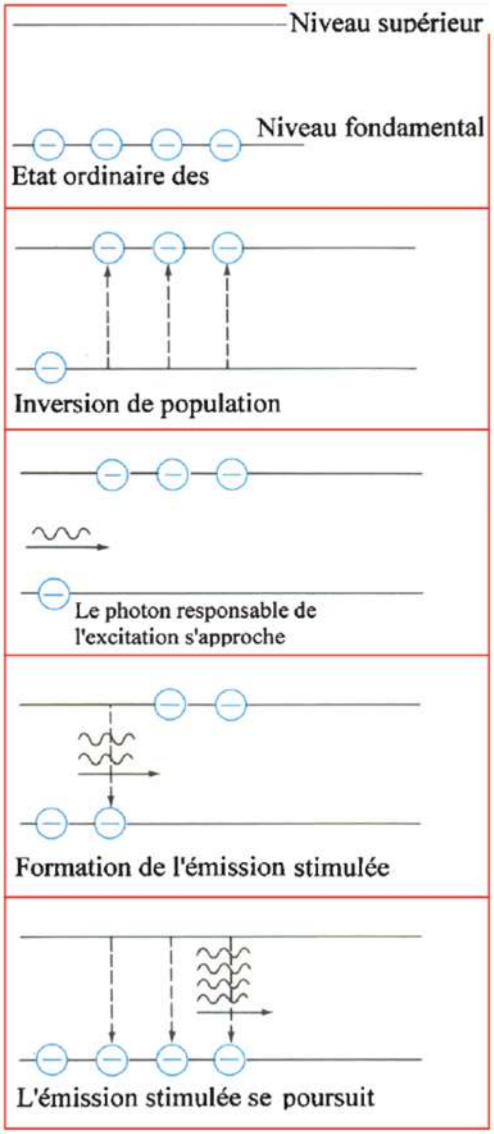



**Figure (14-8b)**
Etapes de production du laser

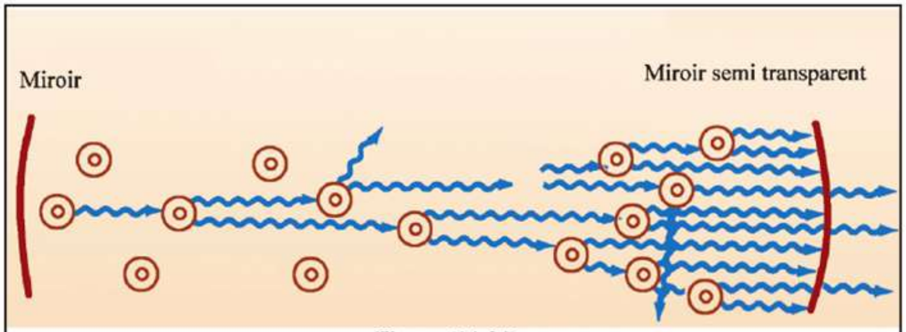



**Figure (14-8d)**
Multiples réflexions sur les deux miroirs

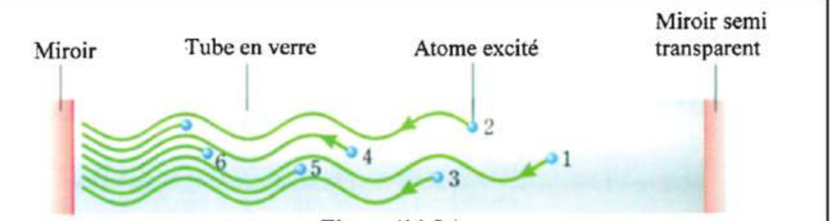



**Figure (14-8e)**
Amplification de la lumière

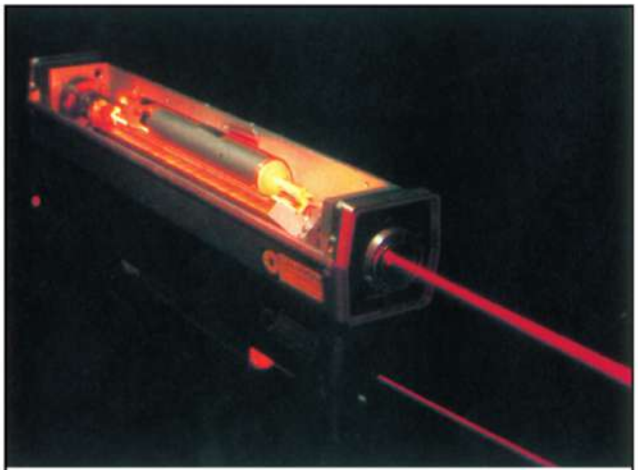


**Figure (14-8f)**
Rayon sortant du miroir semi transparent

## Laser à hélium-néon :

• On a choisi ces deux gaz car leurs niveaux d'excitation presque stable sont très proches l'un de l'autre.

### A) Composition :

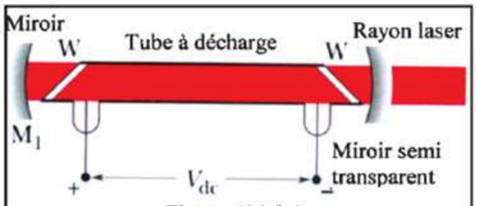


**Figure (14-9a)**
Schéma du générateur laser à hélium-néon

L'appareil compr nd :

1- Un tube en verre (quartz) contenant le mélange hélium-néon dans le rapport respectif de 1 à 10 sous une faible pression d'environ 0,6 mm de mercure (figure 14-9).

2- Deux miroirs plans, parallèle s entre eux et perpendiculaires à l'axe du tube. L'un d'eux est totalement réfléchissant et l'autre est semi transparent.

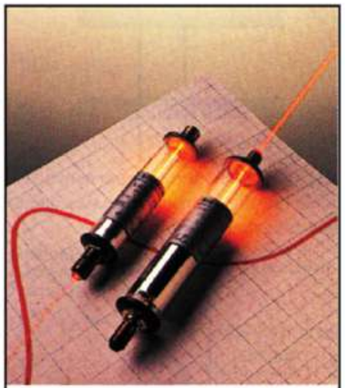


**Figure (14-9b)**
Vue extérieure de l'appareil

3- Un champ électrique alternatif extérieur de haute fréquence ou une très grande d.d.p. continue sont utilisés pour exciter les atomes des deux gaz.

### B) Fonctionnement :

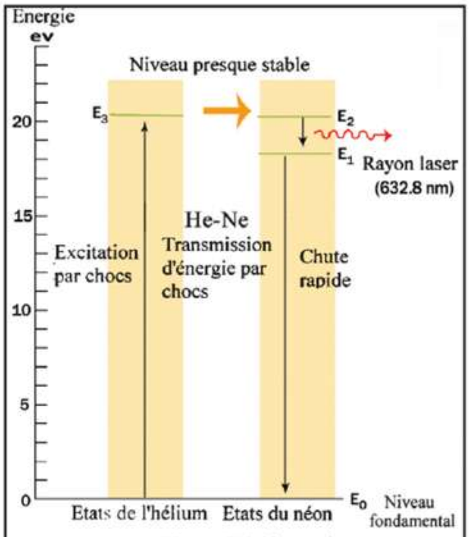


**Figure (14-10a)**
Transmission d'énergie par les chocs des atomes d'hélium avec ceux du néon

1. La grande d.d.p. produit dans le tube une décharge qui excite les atomes d'hélium aux niveaux d'énergies supérieurs (figure 14-10).
2. Les atomes excités d'hélium heurtent les atomes de néon non excités. Le choc n'étant pas élastique, l'énergie est transmise aux atomes de Néon qui deviennent ainsi excités à des niveaux proches de ceux de l'hélium.
3. Les atomes excités du néon s'accumulent à un niveau d'énergie supérieur presque stable car sa durée de vie est relativement grande ($10^{-3}$ seconde) ainsi se produit l'inversion de population dans le néon.
4. Quelques atomes excités de néon retournent spontanément à un niveau

inférieur produisant des photons dont l'énergie est égale à la différence d'énergie de ces deux niveaux. Ces photons sont incohérents et ils se propagent dans le 5. Les photons qui se déplacent le long de l'axe du tube rencontrent l'un des deux miroirs, ils se réfléchissent à l'intérieur du tube et ne sortent pas.

6. Les photons qui se réfléchissent entre les deux miroirs cognent d'autres atomes de néon excités au niveau d'énergie presque stable dont la durée de vie ne s'est pas terminée. Il en résulte une émission stimulée qui double le nombre de photons cohérents qui circulent dans le sens de l'axe du tube.

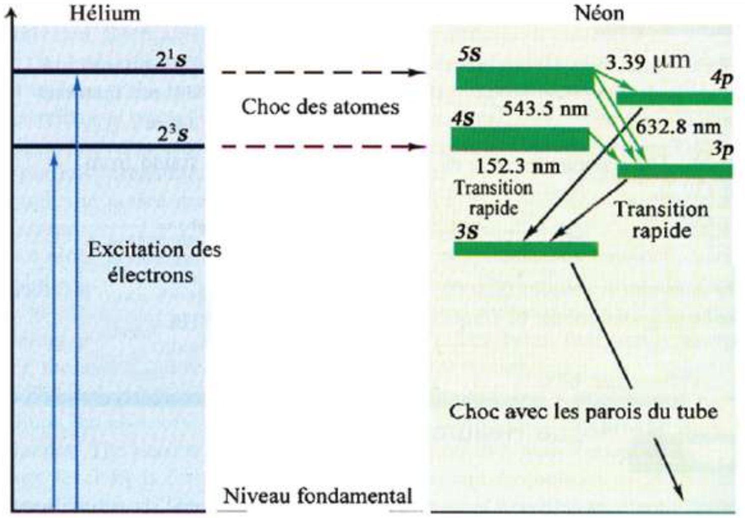



**Figure (14-10b)**
Transition entre les niveaux d'énergie dans le laser à (He-Ne)

7. L'étape précédente se répète mais avec un plus grand nombre de photons qui se réfléchissent sur les deux miroirs. Leur nombre double à nouveau et ainsi se poursuit l'amplification de l'intensité.

8. Lorsque l'intensité du rayon dans le tube atteint une valeur limite, une partie de celui-ci sort par le miroir semi transparent produisant ainsi le rayon laser. L'autre partie du rayon reste dans le tube pour poursuivre l'émission stimulée.

9. Les atomes de néon qui ont transité vers un niveau inférieur passent très vite au niveau fondamental en perdant de l'énergie sous plusieurs formes. Les atomes d'hélium heurtent à nouveau ces atomes de néon et les font passer au niveau d'excitation presque stable.

10. Les atomes d'hélium qui ont perdu leur énergie après le choc avec les atomes de néon sont à nouveau excités par la décharge électrique dans le tube.

## Applications du laser :

• Il existe plusieurs genres et formes de générations lasers. La lumière laser couvre une grande partie de spectre électromagnétique en partant de la région infrarouge à l'ultraviolet.

• Certains générateurs lasers peuvent concentrer la lumière en un point avec une énergie suffisante pour liquéfier ou vaporiser le fer et pour tailler un diamant.

• Dans le programme militaire américain appelé "guerre des étoiles", le rayon laser a une énergie suffisante pour détruire un avion ou une fusée.

• Voici quelques applications du rayon laser :

### A. L'holographie ou la photographie en relief :

• L'image d'un corps éclairé est formée par l'assemblage des rayons lumineux ayant quitté sa surface en portant les informations concernant celui-ci vers l'endroit où se forme l'image (plaque photographique). Dans une photo ordinaire, l'image apparaît à cause de la variation de l'intensité lumineuse d'un point à un autre.

• Prenons deux rayons ayant quitté deux points de la surface éclairée :

1) Il existe entre eux une différence d'intensité lumineuse due à une différence d'amplitude (l'intensité lumineuse est proportionnelle au carré de l'amplitude).

2) Il existe aussi, entre eux, une différence de marche due au relief de la surface éclairée. C.à.d. qu'il existe une différence de phase entre ces deux rayons (égale à $\frac{2\pi}{\lambda} \times$ différence de marche)

• La plaque photographique ordinaire enregistre uniquement une partie des informations, celles qui concernent les variations d'intensité lumineuse.

• En 1948, le savant hongrois Gabor (prix Nobel) trouve le moyen d'obtenir les informations perdues en utilisant d'autres "rayons référentiels" qui sont parallèles et qui ont la même longueur d'onde que ceux émis par l'objet éclairé.

• Les rayons du faisceau référentiel interfèrent avec les rayons venant de l'objet éclairé portant touts les informations. Cette interférence se produit sur la plaque photographique où apparaissent après son développement les franges d'interférence. On obtient ainsi une image codée appelée "hologramme".

• En éclairant celui-ci avec des rayons lasers de même longueur d'onde on peut observer à l'œil nu une image identique à celle de l'objet en trois dimensions et ceci sans utiliser des lentilles. Cette image ne peut être obtenue qu'en utilisant des rayons lasers car ils sont cohérents.

• La partie inférieure de la figure (14-11) montre le système optique utilisé pour obtenir un hologramme en utilisant un rayon laser. Il est possible d'enregistrer plusieurs dizaines d'images sur un seul hologramme. Il est encore possible d'obtenir sur un hologramme des images en relief d'un corps en mouvement.

## Enrichissons nos connaissances :

### Genres d'hologrammes :

• L'hologramme est un réseau de diffraction qui est une généralisation de la fente double (de Youn g) où se produit une interférence des ondes qui le traverse.

• On fabrique l'hologramme en enregistrant simultanément sur une plaque les rayons réfléchis par le corps éclairé avec un faisceau de lumière laser et les rayons référentiels. A ce moment on obtient des franges d'interférence entre les deux rayons. La plaque est ensuit développée comme un film photographique.

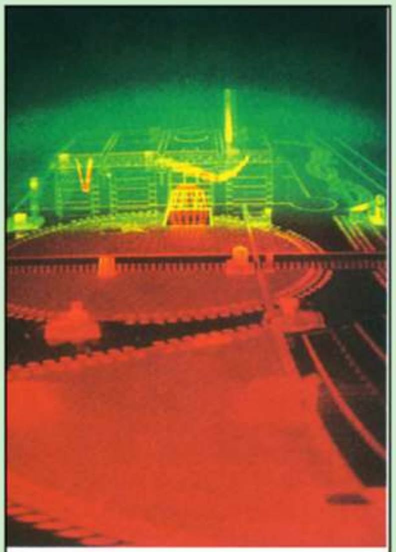


**Figure (14-11)**
Image en relief obtenue dans l'espace

• Pour lire l'hologramme on l'éclaire à nouveau avec un rayon laser dans la même direction que celle de l'enregistrement. Ce rayon réagit selon les figures formées sur l'hologramme et il dévie.

• En regardant l'hologramme dans la direction des rayons référentiels, on voit une image virtuelle en relief, suspendue dans l'air, de l'autre côté de l'hologramme, c.à.d. du côté des rayons lasers incidents.

• On peut aussi obtenir une image réelle sur un écran matériel ou un écran de fumée placé du côté de l'observateur.

• L'hologramme décrit précédemment est appelé "hologramme de transmission". Si on l'éclaire par une source de lumière ordinaire, on obtient une image en couleurs. Cet hologramme est éclairé par l'arrière (figure 14-12).

• "L'hologramme de réflexion", qui est un autre genre, est éclairé par l'avant, soit par une lumière ordinaire ou un rayon laser. L'éclairage se fait du côté de l'observateur.

• "L'hologramme à relief" agit comme celui de la réflexion mais il est moins coûteux. C'est en fait un hologramme à transmission derrière lequel on fixe un miroir.

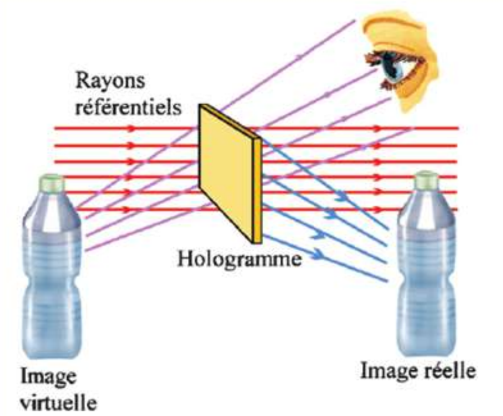



**Figure (14-12b)**
L'hologramme est un réseau de diffraction

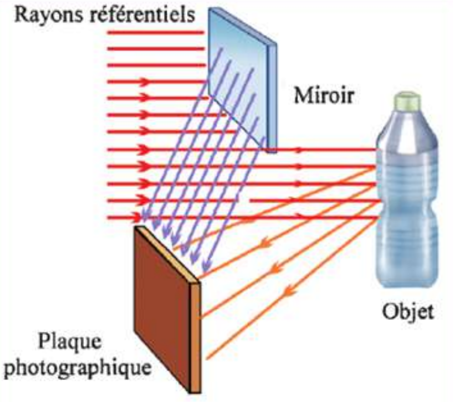



**Figure (14-12a)**
Formation de l'hologramme

• "L'hologramme à pulsations" qui utilise des pulsations très fortes de rayons lasers. On fabrique cet hologramme pour la prise de vue de grands objets, de la nature et d es pers onnes. Grâce à la succession des images on peut obtenir le mouvement de ces corps. C'est le principe du cinéma en relief (figure 14-13).

**Figure (14-13)**
La succession des images permet d'obtenir le mouvement

## B. En médecine :

• La rétine est formée de cellules sensibles à la lumière. Il arrive parfois que certaines parties de cette rétine se décollent et elles perdent ainsi leur fonction. Si on ne le soigne pas rapidement, le décollage peut être total et l'œil perd la vue.

• Le traitement consiste à souder les parties décollées avec la couche sous-jacente. Dans le passé cette opération prenait beaucoup de temps et d'effort. Avec le laser la soudure se fait en une fraction de seconde.

**Figure (14-14)**
Usage du laser pour traiter le décollement de la rétine

• Un rayon laser très fin traverse la pupille et va vers la partie décollée ou déchirée de la rétine. L'énergie calorifique de ce rayon permet la soudure immédiate.

• On utilise le laser pour le traitement d e la myopie et de l'hypermétropie. Le patient n'a plus besoin de porter des lunettes (figure 14-15).

• On utilise aussi les rayons lasers avec les fibres optiques pour l'investigation médicale et les soins médicaux au moyen des "endoscopes" (figure 14-16).

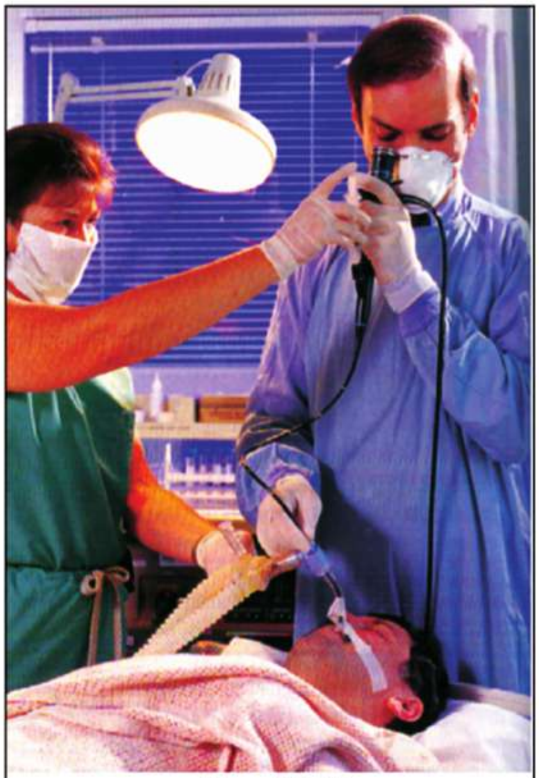


**Figure (14-16)**
Utilisation des rayons lasers dans la chirurgie à endoscopes

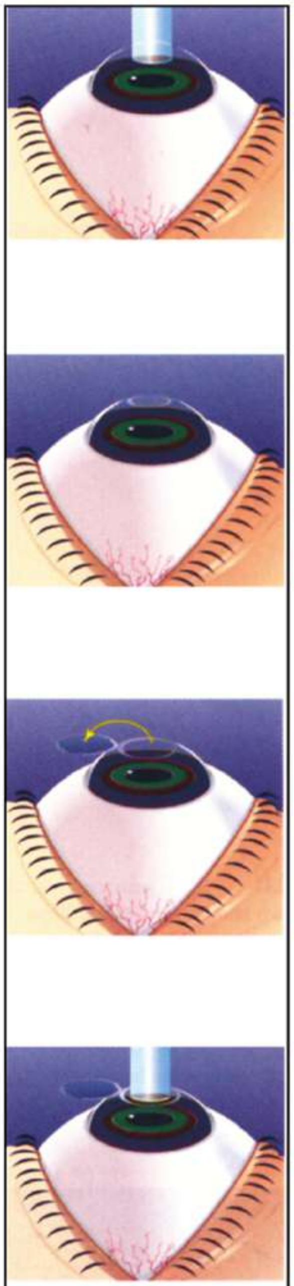


**Figure (14-15)**
Etapes du traitement de la cornée par laser

**C. Dans les télécommunications** où le rayon laser et les fibres optiques remplacent les câbles téléphoniques.

**D. Dans l'industrie** et en particulier dans la micro technologie.

**E. Dans le domaine militaire :** guidage très précis des fusées et des bombes ainsi que le LADAR qui est le radar au laser.

**F. L' enregistrement sur les disques compacts (CD)** (figure 14-17).

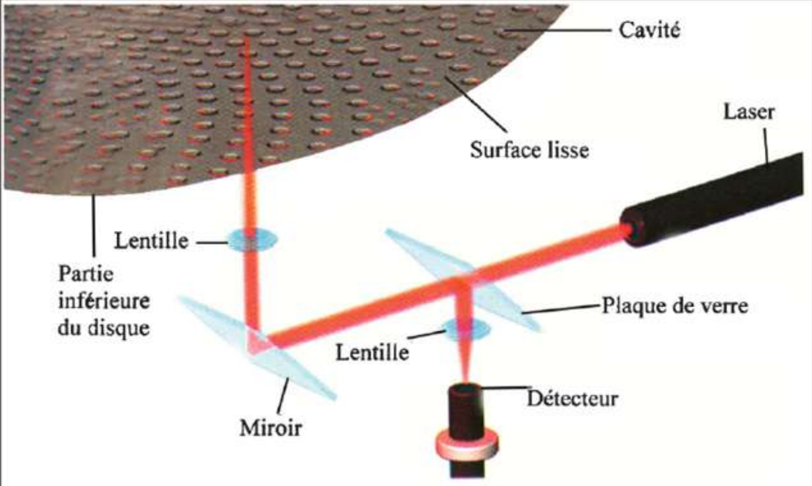



**Figure (14-17a)**
Enregistrement par laser sur un disque compact

**Figure (14-17b)**
Disques compacts

**G. L'imprimante au laser** (figure 14-18) où le rayon laser est utilisé pour transmettre les informations venant de l'ordin ateur au disque recouvert d'une matière sensible à la lumière. L'image est ensuite imprimée sur une feuille en utilisant une encre spéciale appelée "toner".

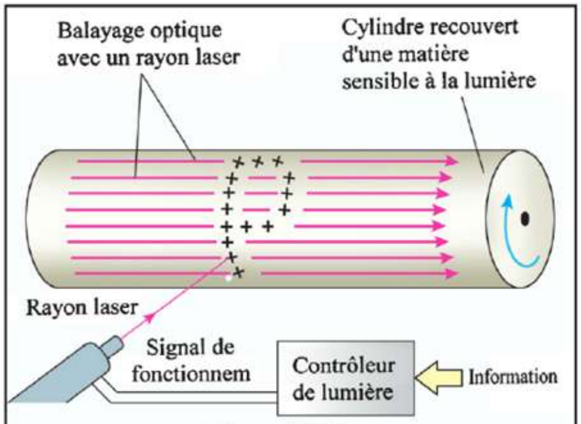



**Figure (14-18)**
Utilisation du laser dans l'imprimante

**H. Arts et jeux de l umière** (figure 14-19)

**Figure (14-19)**
Jeux de lumière

**I. Dans la télémétrie pour mesurer avec précision les surfaces et les distances.**

**J. Dans les recherches spatiales.**

## Résumé

• L'émission spontanée est l'émission de radiations d'un atome excité lors de sa transition d'un niveau d'énergie supérieur à un autre inférieur, après la fin de sa durée de vie, spontanément, et sans aucune intervention extérieure.

• L'émission stimulée est l'émission de radiations d'un atome excité lorsqu'il est traversé par un photon extérieur dont l'énergie est égale à celle qui l'a excité. Il en résulte l'émission de photons cohérents (même phase, direction et fréquence)

• Propriétés du rayon laser :
1- Pureté spectrale
2- Directivité du faisceau lumineux
3- Cohérence des photons
4- Rayons concentrés et intenses

• Principe de fonctionnement du laser :
1- Le milieu efficace doit atteindre l'état de l'inversion de population.
2- L'émission d'énergie par les atomes excités doit se faire par une émission stimulée.
3- L'amplification des radiations produites par l'émission stimulée doit se faire dans une cavité résonante.

• Les générateurs de rayons lasers sont formés de trois parties essentielles :
1- Un milieu efficace matériel
2- Une source d'énergie
3- Une cavité résonante

• Le laser à Hélium-Néon est l'un des lasers à gaz où le milieu efficace est un mélange d'hélium et de néon dans le rapport de 1 : 10.

• Applications du laser :
1- Dans l'holographie (photographie en trois dimensions)
2- En médecine pour soigner la rétine, la myopie et l'hypermétropie
3- Dans les télécommunications
4- Dans l'industrie
5- Dans les domaines militaires
6- Dans l'enregistrement sur disques compacts
7- Dans l'imprimante au laser
8- Dans l'art et les jeux de lumière
9- Dans la télémétrie
10- Dans la recherche spatiale

# Questions

1. Que signifie le mot "laser" ?

2. Comparer l'émission spontanée à l'émission stimulée des points de vues : production et propriétés.

3. Le rayon laser a des propriétés qui le distinguent de la lumière ordinaire. Expliquer, en détails, chacune de ces propriétés.

4. Expliquer, en détails, le principe de fonctionnement du laser.

5. Que veut on dire par :
L'opération de pompage – l'état de l'inversion de population.

6. Quel est le rôle de la cavité résonante dans la production du rayon laser ?

7. Les générateurs de rayons lasers sont formés de trois parties essentielles. Quelles sont ces parties ?

8. Pourquoi a-t-on choisi les deux gaz Hélium-Néon comme milieu actif (efficace) dans la production du rayon laser ?

9. Quel est le rôle de l'hélium dans la production du laser à Hélium-Néon ?

10. Expliquer, en détails, comment est produit le rayon laser à Hélium-Néon ?

11. Expliquer, en détails, comment se produit la photographie en trois dimensions en utilisant le rayon laser.

12. Le laser est souvent utilisé en médecine. Expliquer l'une de ses applications dans ce domaine.

13. Dans les domaines militaires, le laser joue un rôle important dans le guidage des fusées. Sur quel principe est basé le choix du laser pour ce guidage ?

# Introduction à la Physique Moderne

# Unité 2

# Chapitre 8 : L'électronique moderne

# Chapitre 8

## L'électronique moderne

### Introduction :

Les atomes oscillent de part et d'autre d'un point d'équilibre à cause des forces d'attraction et de répulsion qui existent entre eux. Ces oscillations qui sont causées par l'effet de la chaleur, par exemple, impliquent la présence d'un espace vide entre eux. Ces espaces ne sont pas visibles à l'oeil nu car la distance inter atomique est très inférieure à la plus courte des longueurs d'ondes du spectre visible.

---

### Les semi-conducteurs purs :

- On divise les corps solides d'après leur conductibilité électrique en trois catégories :

1. Les conducteurs qui se laissent traverser facilement par le courant électrique et la chaleur (comme tous les métaux)

2. Les isolants qui ne se laissent presque pas traverser par le courant électrique et la chaleur (comme le bois et le plastique).

3. Les semi-conducteurs qui représentent un état intermédiaire entre les deux états précédents et dont la conductibilité augmente avec la température (comme le silicium).

- Le silicium est un élément très répandu sur la Terre. Il entre dans la composition du sable et des roches de l'écorce terrestre. Le cristal pur de silicium est formé d'atomes liés par des liaisons covalentes.

(A l'état solide les atomes du cristal sont ordonnés suivant une forme géométrique régulière qui se répète).

• L'atome de silicium contient quatre électrons dans la couche externe (figure 15-1). Chacun de ces atomes met en commun ses quatre électrons av ec quatre autres électrons venant des atomes voisins par des liaisons covalentes tel que chaque atome se trouve entouré dans sa couc he exter ne par h uit électrons (figure 15-2a ; 15-2b).

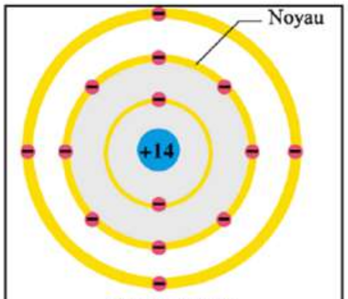


**Figure (15-1)**
Atome de silicium

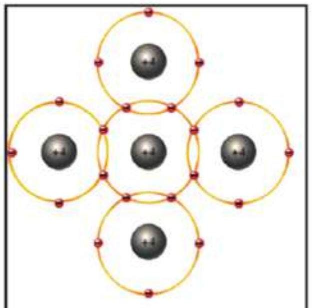


**Figure (15-2a)**
Chaque atome partage ses électrons avec ses 4 atomes voisins

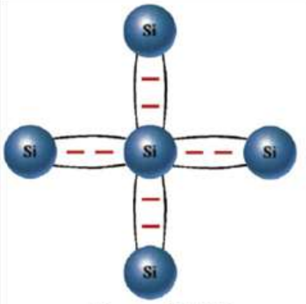


**Figure (15-2b)**
Liaisons covalentes

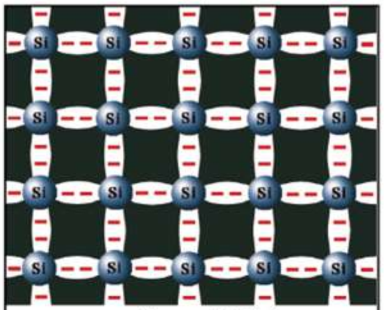


**Figure (15-2c)**
Cristal de silicium au zéro absolu (toutes les liaisons sont complètes)

• Il faut distinguer deux types d'électrons dans les atomes de silicium :

1. Les électrons des couches d'énergie intérieures qui sont fortement liés au noyau.
2. Les électrons des couches d'énergie extérieures (couches de valence) qui ont une plus grande liberté de mouvement dans les espaces inter atomiques.

• A basse température, toutes les liaisons covalentes sont complètes et on ne trouve pas d'électrons libres contrairement aux métaux (figure 15-2c).

• En élevant la température du silicium, certaines liaisons se brisent en libérant quelques électrons qui laissent un espace vide appelé "trou". Ce trou se comporte comme une charge positive car la perte d'un électron d'un atome électriquement neutre est équivalente à l'apparition d'une charge positive.

• L'atome dont l'une de ses liaisons s'est brisée n'est pas appelé "ion" car le trou attire très vite un électron d'une liaison voisine. Ainsi l'atome reste toujours neutre et les trous se déplacent d'une liaison à une autre (figure 15-3a et b).

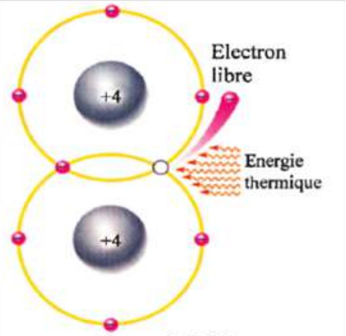



**Figure (15-3a)**
La rupture d'une liaison nécessite de l'énergie

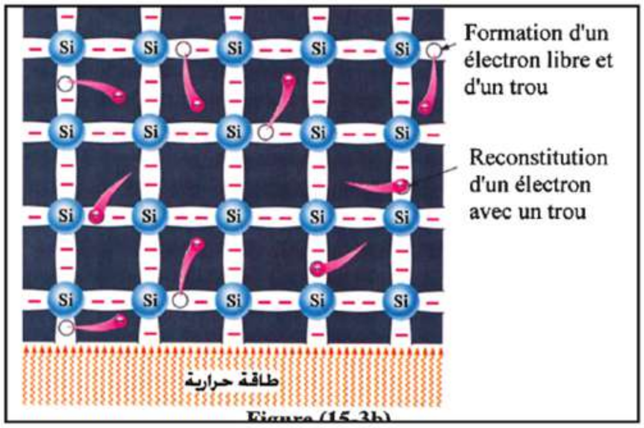



**Figure (15-3b)**

• Dans le cristal de silicium pur, le nombre d'électrons libres est égal au nombre de trous. Plus la température augmente, plus le nombre d'électrons libres et de trous augmente. Cette augmentation se poursuit jusqu'à une température déterminée où le cristal atteint un état "d'équilibre dynamique ou thermique" dans lequel très peu de nouvelles liaisons se brisent. A cette température le nombre de liaisons qui se brisent par seconde est égal au nombre d'électrons libres et de trous formés.

• Ces électrons libres représentent un troisième type d'électrons qui restent quand même liés, mais dans un espace plus grand qui est celui du cristal et qui est limité par la surface de celui-ci.

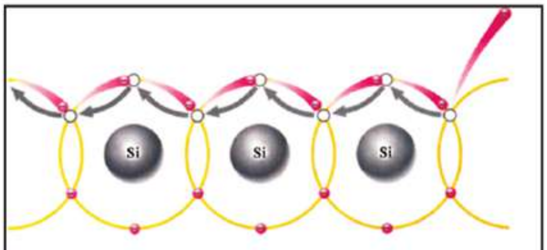


**Figure (15-4a)**
Les trous se déplacent d'une manière aléatoire

• La rupture d'une liaison nécessite une énergie thermique (chaleur) ou lumineuse. La reconstitution de la liaison entraîne l'émission d'un même genre d'énergie.

• Les électrons et les trous se déplacent d'une manière aléatoire. Les électrons se dirigent vers les trous pour remplacer le vide e ngendré par la rupture des liaisons covalentes (figure 15-4 a, b et c).

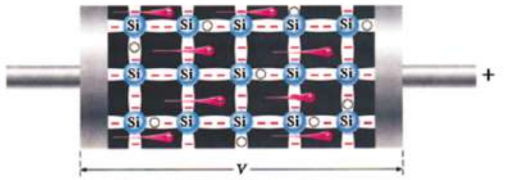


**Figure (15-4b)**
Les trous se déplacent en sens contraire de celui des électrons

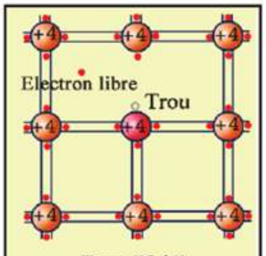



**Figure (15-4 C)**
A une température déterminée, le nombre d'électrons et de trous devietn constant

## Dopage (addition d'impuretés) :

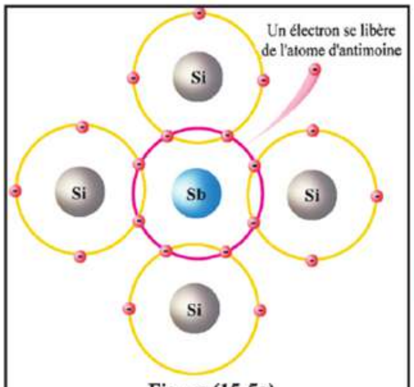


**Figure (15-5a)**
Un atome d'antimoine ($5^{ème}$ groupe) remplace un atome de silicium

• Les semi-conducteurs sont caractéri sés par leur très grande sensibilité aux impuretés et à la chaleur.
Le silicium est un élément du quatrième groupe du tableau périodique. L'addition d'atomes d'un élément du cinquième groupe (pentavalent) comme le phosphore (P) ou l'antimoine (Sb) fait que ceux-ci prennent la place de quelques atomes de silicium (figure 15-15a).

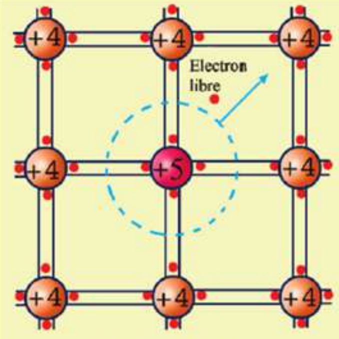


**Figure (15-5b)**
Le dopage par un élément pentavalent produit un électron libre

• L'atome de phosphore ajouté (figure 15-5b) fait des liaisons covalentes avec les atomes de silicium voisins. Quatre électrons parmi les cinq qu'il possède dans la couche externe participent aux liaisons. La force d'attraction agissant sur le cinquième électron étant très faible, l'atom e de phosphore le perd et devient ainsi un ion positif. Cet électron libre s'ajoute ensuite aux autres électrons libres qui se trouvent dans le cristal.

• De cette manière les atomes impurs, appelés "donneurs", deviennent une nouvelle source d'électrons libres.

• Les électrons libres venant de la chaleur et ceux venant des atomes impurs atteignent un état d'équilibre thermique où la somme des charges positives est égale à celle des charges négatives.

$$\boxed{n = p + N_D^+} \qquad (15\text{-}1)$$

Où n est la concentration (ou la densité) des électrons libres, p est celle des trous et $N_D$ est celle des ions positifs des atomes impurs "donneurs".
Puisque n est plus grande que p, donc le silicium dopé par des éléments pentavalents se comporte comme un semi-conducteur négatif qui est appelé "type-N".

• Si au lieu d'ajouter du phosphore ou de l'antimoine, on ajoute un élément du troisième groupe (trivalent) comme l'aluminium (Al) ou le bore (B), chacun de ceux-ci attire un électron d'un atome de silicium voisin dans lequel va apparaître un nouveau trou qui s'ajoute à ceux qui sont formés par l'effet de la chaleur. L'atome impur qui a gagné un électron devient un ion négatif (figure 15-6a,b).

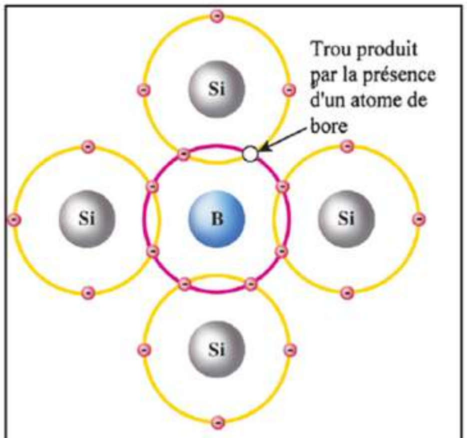



**Figure (15-6a)**
Un atome de bore (3ème groupe) remplace un atome de silicium

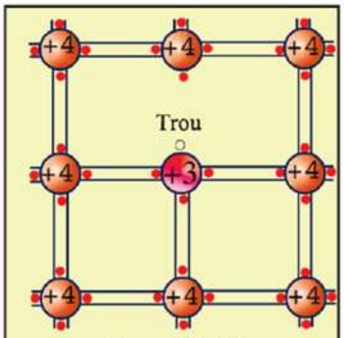



**Figure (15-6b)**
Le dopage par un élément trivalent produit des trous

• Quand se produit l'équilibre thermiqu e on a :

$$\boxed{p = N_A^- + n} \qquad (15\text{-}2)$$

Où p est la concentration (ou la densité) des trous, $N_A$ est celle des ions négatifs venant des atomes impurs appelés "ac cepteurs" et n est celle des électrons libres.

Puisque p est plus grande que n, donc le silicium dopé par des éléments trivalents se comporte comme un semi-conducteur positif qui est appelé "type-P".

Dans les deux cas précédents (type-N et type-P) on a : $\boxed{np = n_i^2}$ (15-3)

Où $n_i$ est la concentration (densité) des électrons libres ou des trous dans un semi conducteur pur (car n = p dans un semi conducteur pur).

• Si n augmente, p diminue et réciproquement. Cette loi est appelée "loi d'action de la masse".

Dans le cas du type-N on a : $\boxed{n \approx N_D^+}$ (15-4)

Donc $N_D \cdot p = n_i^2$ d'où $\boxed{p = \dfrac{n_i^2}{N_D^+}}$ (15-5)

Dans le cas du type-P on a : $\boxed{p \approx N_A^-}$ (15-6)

Donc $n \cdot N_A = n_i^2$ d'où $\boxed{n = \dfrac{n_i^2}{N_A^-}}$ (15-7)

## Les composantes ou les dispositifs électroniques :

• Les dispositifs électroniques sont les unités de la structure des systèmes électroniques (figures 15 - 7).

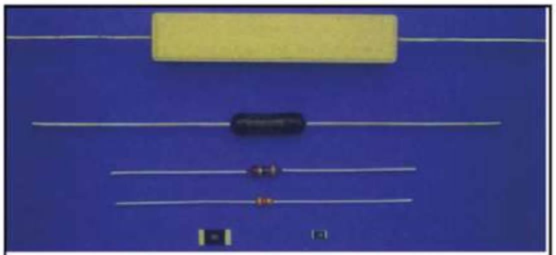


**Figure (15-7a)**
Résistances

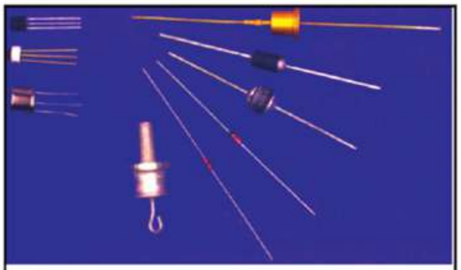


**Figure (15-7b)**
Diodes et transistors

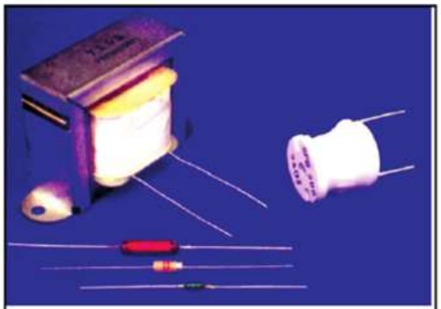


**Figure (15-7c)**
Bobines d'induction

**Figure (15-7d)**
Condensateurs

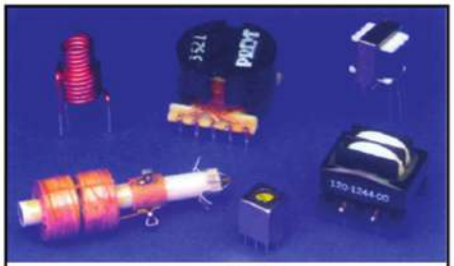


**Figure (15-7e)**
Transformateurs

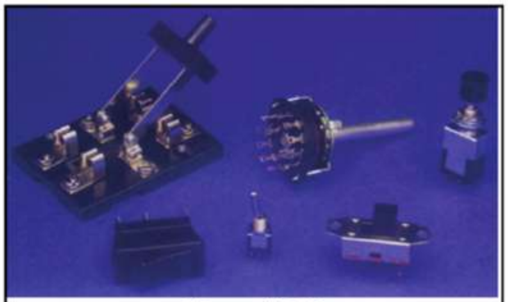


**Figure (15-7f)**
Interrupteurs

**Figure (15-7g)**
Divers dispositifs et composantes électroniques.
(Peux-tu les identifier ?)

Quelques-uns sont simples comme la résistance (R), la bobine d'induction (L) et le condensateur (C). Tandis que d'autres sont plus compliqués comme la jonction PN (diode) et les différents types de transistors. On a aussi d'autres dispositifs spéciaux comme les dispositifs photoélectriques, les contrôleurs de courant et d'autres.

• Les semi-conducteurs utilisés pour fabriquer ces dispositifs se distinguent par leur sensibilité à divers facteurs comme la lumière, la chaleur, la pression, la pollution nucléaire et d'autres. C'est pourquoi ils sont utilisés comme "détecteurs" qui sont des appareils de mesure de ces facteurs : l'intensité lumineuse, la température, la pression, l'humidité, la pollution, la radiation nucléaire et d'autres.

## La jonction PN (Ou diode) :

• Cette jonction est formée de deux régions en contact ; l'une est de type-N et l'autre de type-P (figure 15-8).

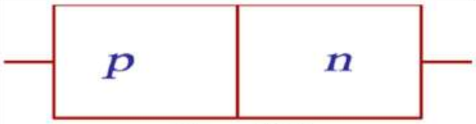



**Figure (15-8)**
Jonction PN

• Quelques trous du type-P, do nt la concentration est élevée, se diffusent dans le type-N où la concentration des trous est faible. De même quelques électrons du type-N, dont la concentration est élevée, se diffusent dans le type-P où la concentration des électrons est faibl e.

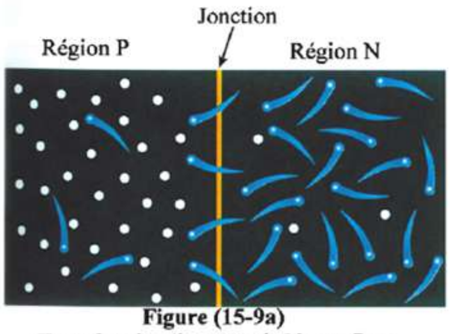
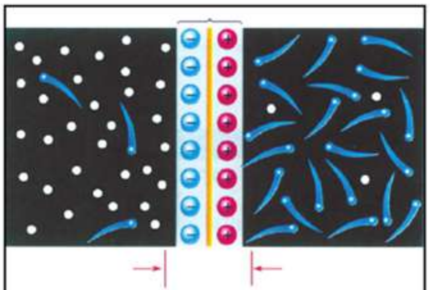



**Figure (15-9a)**
Transfert des électrons de N vers P et des trous de P vers N

• Ainsi un courant de diffusion est engendré par le déplacement des trous du type-P vers le type-N et des électrons du type-N vers le type-P.
Puisque chaque région est électriquement neutre (séparément), à cause de l'égalité des charges négatives et des charges positives, la migration des électrons du type-N provoque l'apparition d'ions positifs sur N engendrée par la perte d'électrons. De même la migration des trous du type-P provoque l'apparition d'ions négatifs sur P engendrée par la perte de trous.



Zone de déplétion
**Figure (15-9b)**
Région vide d'électrons et de trous (formée uniquement d'ions)

• Une région vide d'électrons et de trous se forme au voisinage de la surface de séparation des deux cristaux qui est appelée "zone de déplétion". De part et d'autre de

cette zone il existe d'un côté des ions positifs et de l'autre côté des ions négatifs.

• Un champ électrique de direction $\overrightarrow{NP}$ engendre un courant appelé "courant dérivé" (courant indirect) en sens contraire du courant de diffusion (courant direct).

• Dans l'état d'équilibre, le courant direct s'annule avec le courant indirect et le courant résultant est nul (figure 15-9).

• En reliant une pile "source extérieure de tension" de sorte que P soit relié au pôle positif et N au pôle négatif, le sens du champ électrique venant de la pile est de sens contraire à celui venant de la zone de déplétion, ce qui affaiblit celui-ci.

Si l'o n inverse la polarité de la pile, les deux champs seront de même sens (figure 15-10a et b).

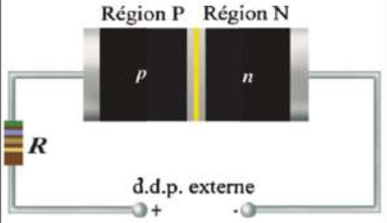


**Figure (15-10a)**
Application d'une d.d.p. dans le sens direct

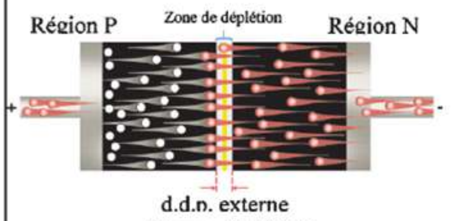


**Figure (15-10b)**
Mouvement des électrons et des trous sous l'action d'une d.d.p. externe

• Si P est relié au pôle positif d'une pile et N au pôle négatif on a une "polarisation directe" et le courant passe facilement car la résistance de la jonction est très faible. Mais si P est relié au pôle négatif de la pile et N au pôle positif on a une "polarisation indirecte" et le courant ne passe presque pas car la résistance de la jonction devient très grande (figures 15-11).

• Donc la jonction PN permet le passag e du courant dans le sens direct et l 'empêche de passer dans le sens indirect (figure 15-12). Ainsi cette jonction joue le rôle d'un interrupteur qui est fermé dans le sens direct et ouvert dans le sens indirect (figure 15-13).

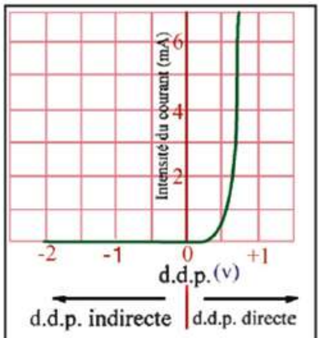


**Figure (15-12)**
Relation entre la d.d.p. et l'intensité du courant dans une jonction PN

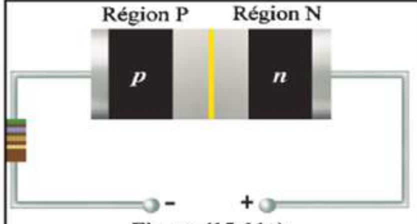


**Figure (15-11a)**
Polarisation indirecte

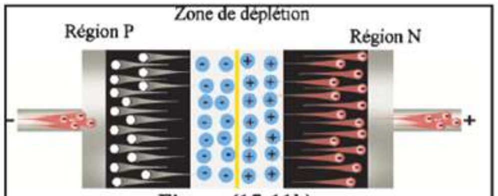
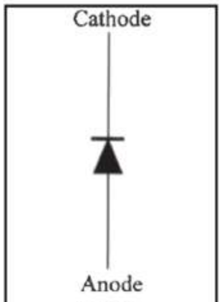


**Figure (15-11b)**
Mouvement des électrons et des trous par la polarisation indirecte

• On peut s'assurer du bon fonctionnement de la jonction en utilisant un ohmmètre. Celui-ci indique une petite résistance dans le sens direct et une très grande résistance dans le sens indirect. Le comportement de cette jonction n'est pas le même que celui d'une résistance ordinaire où le courant passe avec la même intensité dans les deux se ns.



Anode
**Figure (15-13a)**
Symbole de la diode

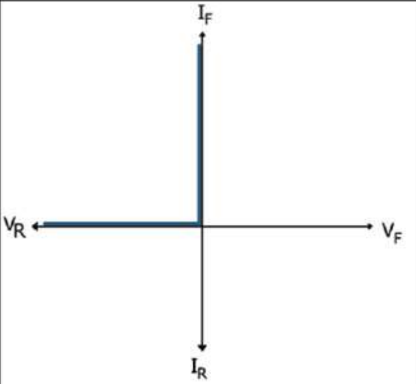


**Figure (15-13b)**
Relation approximative entre I et V

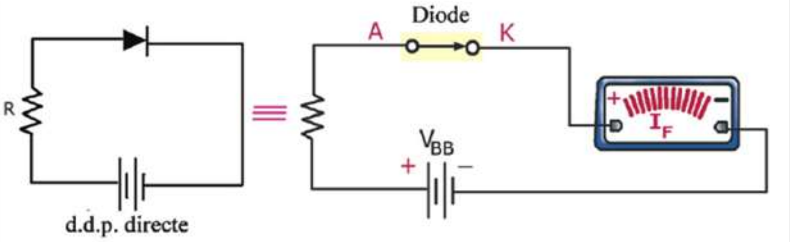


**Figure (15-13c)**
Dans le sens direct, la jonction joue le rôle d'un interrupteur fermé

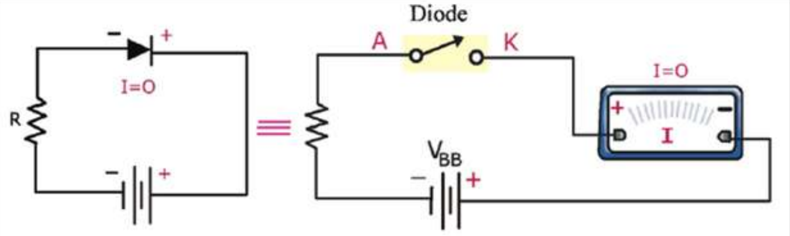


**Figure (15-13d)**
Dans le sens indirect, la jonction joue le rôle d'un interrupteur ouvert

• La jonction PN ou diode joue un rôle très important dans le redressement du courant alternatif CA. (c'est-à-dire obtenir un courant de sens unique) puis de le transformer en courant continu CC pour charger les batteries des voitures et des téléphones portables (figure 15-14).

## Enrichissons nos connaissances :

### A. Comment transformer le C.A. en C.C. ?

• On peut transformer le C A. en CC. en plusieurs étapes :
On utilise une seule diode avec une résistance pour redresser le courant en demi-onde (figure 15-14a,b).

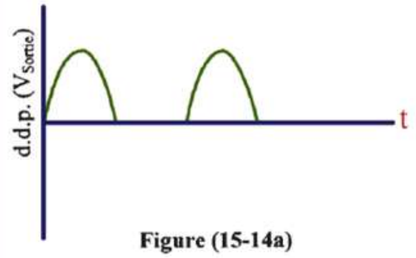



Figure (15-14a)

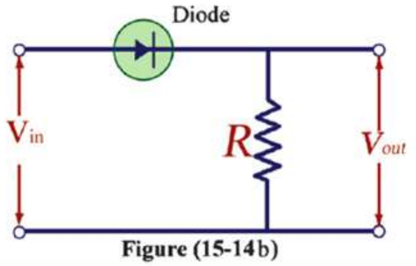
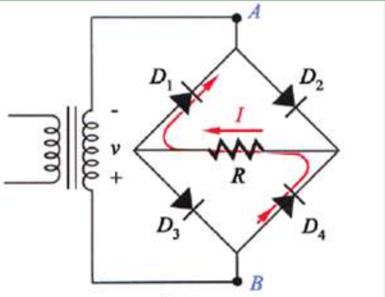
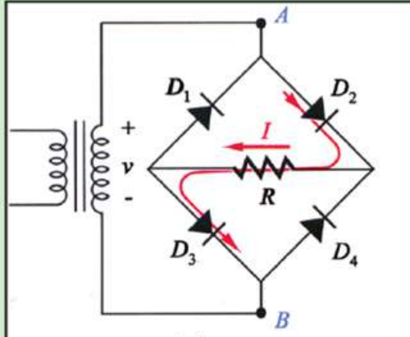



Figure (15-14b)




(b)
Figure (15-14c)




(a)
Figure (15-14d)

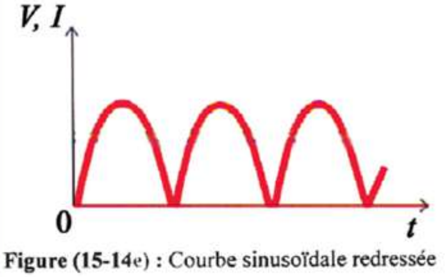



Figure (15-14e) : Courbe sinusoïdale redressée

• On peut aussi obtenir un courant d'intensité à peu près constante en ajoutant un condensateur au circuit (figure 15-14f et g ).

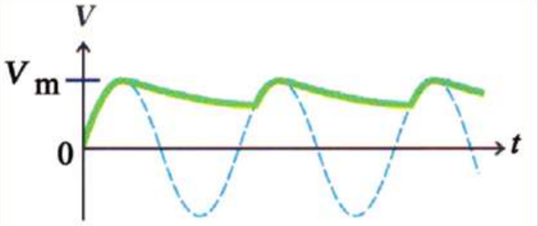



Figure (15-14f)

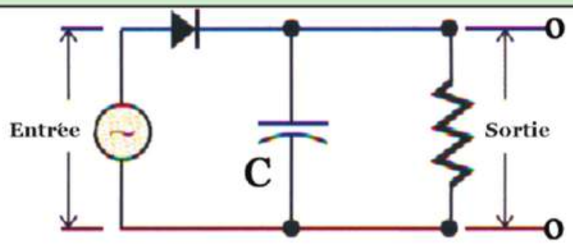



Figure (15-14g)

## Enrichissons nos connaissances :

### B. La syntonisation électronique :

• Pour capter une station de radio ou de télévision déterminée il faut ajuster la capacité d'un condensateur relié à une bobine d'induction afin que la fréquence du circuit soit égale à celle de la station. Cet ajustement est appelé "résonance".

• Dans les appareils modernes on remplace le condensateur variable par une diode polarisée dans le sens indirect. Plus la d.d.p. augmente, plus la largeur de la région de déplétion augmente (figure 15-15).

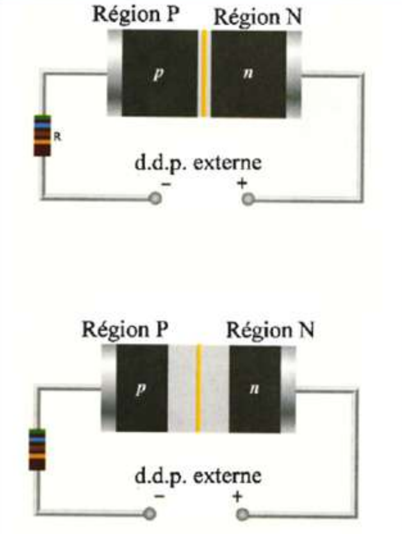



**Figure (15-15)**
La largeur de la zone de déplétion augmente avec l'augmentation de la d.d.p. indirecte

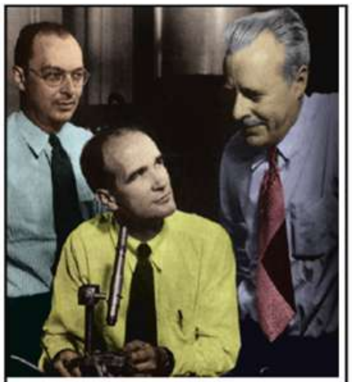
• La variation de cette région provoque la variation du nombre d'ions accumulés. Ceci ressemble à la variation de charges sur les armatures d'un condensateur quand on varie la d.d.p. entre elles.

• Ainsi la syntonisation électronique consiste à varier la d.d.p. aux bornes d'une diode polarisée dans le sens indirect qui se comporte comme un condensateur dans le circuit résonant.

## Le transistor :

• En 1955, les physiciens Bardeen, Shockley et Brattain ont découvert le transistor.

• Il existe différents types de transistors, on étudiera seulement le type PNP qui est formé d'une région P en contact avec une région N, en contact avec une région P et le type NPN qui est formé d'une région N en c ontact avec une région P, en contact avec une région N. (figure 1 5-16).



**Inventeurs du transistor**
Bardeen, Shockley et Brattain

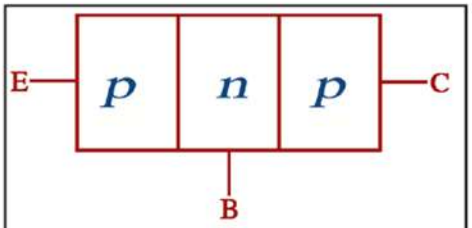



**Figure (15-16a)**
Transistor PNP

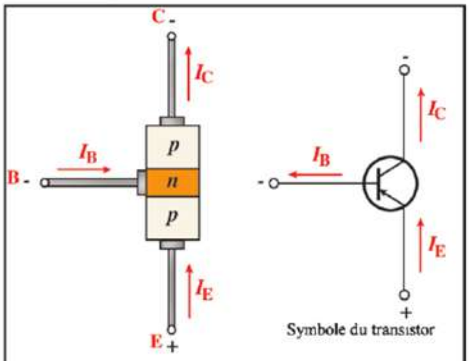



**Figure (15-16b)**
Transistor PNP

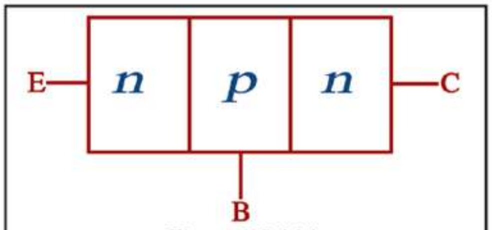



**Figure (15-16c)**
Transistor NPN

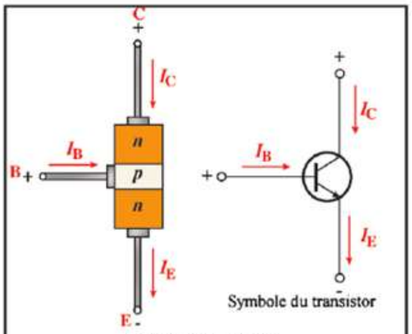



**Figure (15-16d)**
Transistor NPN

• La première région est appelée "émetteur" (E), la région intermédiaire dont la largeur est très étroite est appelée "base" (B) et la dernière est appelée "collecteur" (C).

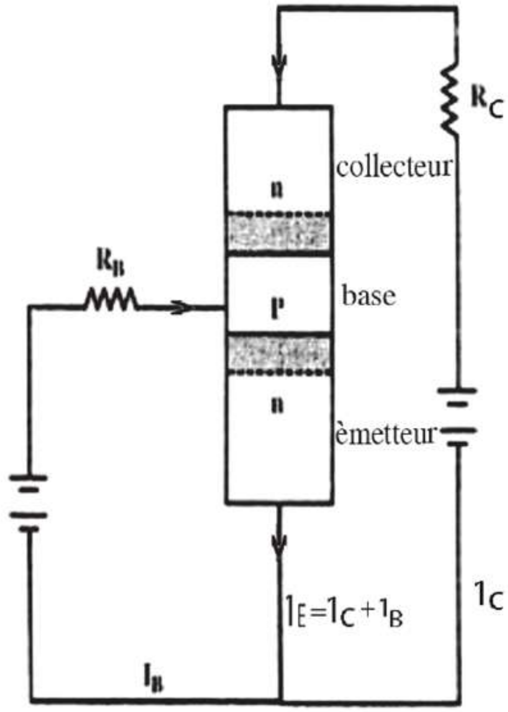
• Prenons par exemple le type PNP, la première jonction PN est polarisée directement tandis que la deuxième jonction NP est polarisée indirectement. Les trous se dirigent de l'émetteur positif P vers la base négative N puis ils se diffusent vers le collecteur négatif P.

Puisque les trous sont diffusés dans la base qui est remplie d'électrons, la reconstitution dans celle-ci consomme une partie de ces trous.

• Si $I_E$ est le courant de l'émetteur, $I_C$ est le courant du collecteur et $I_B$ est le courant consommé à la base ; on a : $\frac{I_C}{I_E} = \alpha_e$ d'où $I_C = \alpha_e I_E$ et $I_B = (1-\alpha_e) I_E$. Le rapport ($\beta_e$) du courant du collecteur au courant de la base est calculé par la relation :

$$\beta_e = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha_e I_E}{(1-\alpha_e) I_E} = \frac{\alpha_e}{1-\alpha_e} \qquad (15\text{-}8)$$

• La largeur de la base étant très faible, elle ne prend pas beaucoup de trous ($I_E \approx I_C$), c'est-à- dire que la valeur de ($\alpha_e$) est proche de 1 ainsi la valeur de ($\beta_e$) appelé « gain de courant » est très grand.




• De cette manière si on introduit un petit signal électrique entre l'émetteur et la base, celui-ci sera amplifié dans le collecteur. Ceci est le principe de fonctionnement du transistor comme amplificateur. Ce principe est appelé "action du transistor" (figure 15-17a,b).

## Transistor fonctionnant comme interrupteur :

• Considérons le circuit du collecteur, on a : $V_{CC} = V_{CE} + I_C.R_C$, où $V_{CC}$ est la d.d.p. de la batt erie qui est constante, $V_{CE}$ est la d.d.p. entre le collecteur et l'émetteur, $I_C$ est l'intensité du courant du collecteur et $R_C$ est la résistance reliée au collecteur (figure 15-18).

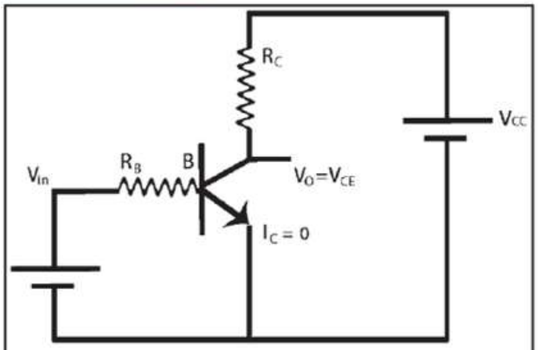



**Figure (15-18a)**
Transistor utilisé comme un interrupteur fermé

• Plus $I_C$ augmente, plus $V_{CE}$ diminue jusqu'à atteindre une valeur minimale de 0,2V, à ce moment le courant de la base est très grand.

• Le potentiel de l'émett eur étant constant et commun à la base et au collecteur, si l'on applique sur la base un potentiel d'entrée variable, on obtient entre les bornes du collecteur un potentiel de sortie tel que :

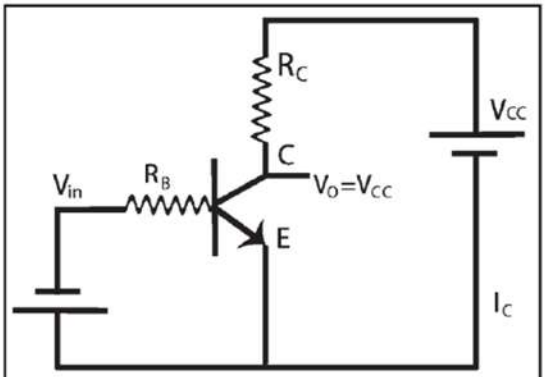



**Figure (15-18b)**
Transistor utilisé comme un interrupteur ouvert

1. Si le potentiel de la base augmente (devient plus positif), la d.d.p. de sortie aux bornes du collecteur diminue.

2. Si le potentiel de la base diminue (devient négatif ou moins positif), le courant $I_C$ du collecteur s'annule et la d.d.p. de sortie aux bornes du col lecteur augmente.

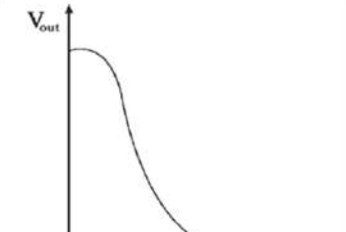



**Figure (15-18c)**
Propriétés de l'inverseur

•Ainsi le transistor fonctionne comme un "inverseur" ou un interrupteur c.à.d. qu'il laisse passer le courant dans le collecteur ou qu'il l'arrête.

• On peut vérifier la polarité du transistor en utilisant un ohmmètre (comment ?).

## Electronique numérique :

• Tous les appareils électroniques transforment des grandeurs physiques en signaux électriques. On peut citer comme exemples :

- Le microphone transforme les vibrations sonores en oscillations électriques.
- La caméra vidéo transforme l'image en oscillations électriques.
- Les sons et les images se transforment en oscillations électriques, puis en oscillations électromagnétiques qui se propagent dans l'air jusqu'aux antennes des télévisions. Celles-ci les captent et les retransforment en oscillations électriques puis en sons et images.

• Les "appareils électroniques analogues" sont ceux qui traitent les grandeurs physiques comme elles sont. Tandis que les appareils "électroniques numériques" (modernes) sont ceux qui transforment les signaux électriques continus en un "code" discontinu formé de deux nombres qui sont "0" et "1" (système binaire).

Dans le système binaire, le nombre 3 par exemple s'écrit :
$1x2^1 + 1x10^0$ dans la base 10 = $(11)_2$
$(11)_2$ à la base 2 n'est pas le nombre $(11)_{10}$

Le nombre $17 = 1x10^1 + 7x10^0$ à la base 10 = $(10001)_2$ à la base 2

Ainsi tout nombre dans le système binaire qui correspond dans le système décimal aux chiffres des unités, des dizaines, des centaines, etc... est écrit sous la forme $2^0$, $2^1$, $2^2$, etc...
Cette opération appelée "codage" permet de transformer chaque nombre et chaque lettre en un système binaire.

• Les signaux électriques continus se transforment en numériques par un dispositif appelé "convertisseur analogique-numérique". Ces signaux sont captés par le poste récepteur qui les retransforme en signaux analogues par un dispositif appelé "convertisseur numérique-analogique".

• <u>But de cette transformation :</u>
En physique, il existe des signaux électriques irréguliers et inutiles appelées "bruits électriques" engendrés par le mouvement aléatoire des électrons qui produit des courants aléatoires. Ceux-ci interfèrent avec les signaux portants les informations (sons et images) et les brouillent. Ce phénomène peut être constaté dans le cas des postes émetteurs, très faibles, de radio ou de télévision ou aussi dans le cas d'une antenne très faible. Des points noir et blanc apparaissent sur l'écran et il est très difficile de s'en débarrasser.

• Dans l'électronique numérique, le "bruit" n'interfère pas avec les signaux portant les informations (qui eux dépendent de la valeur du signal), car ceux-ci dépendent uniquement du code binaire 0, 1. Le bruit n'étant pas codé, le signal portant les informations est émis à l'état pur.

• La grande pureté des signaux obtenue par l'électronique numérique est utilisée aujourd'hui dans plusieurs domaines comme les téléphones portables, les chaînes des télévisions, les disques compacts et l'ordinateur. Dans celui-ci l'entrée de toute information (chiffres ou lettres) est transformées en code binaire. Dans les caméras numériques, l'image est divisée en éléments très petits appelés "Pixels" puis ensuite codée. L'ordinateur effectue les transformations en codes en utilisant l'algèbre binaire de Boole.

• L'ordinateur stocke les informations temporaires dans une mémoire appelée RAM et les informations permanentes sur le disque dur sous forme d'une aimantation dans un sens déterminé quand on a un 0 et d'une aimantation de sens contraire quand on a le 1.

## Les portes logiques :

Ce sont des circuits qui effectuent les opérations logiques basées sur l'algèbre de Boole, qui est le principe des circuits électroniques, comme l'inversion, la concordance et le choix.

Beaucoup d'applications électroniques modernes, comme les circuits de l'ordinateur et ceux de la télécommunication, dépendent de ces portes logiques.

## 1. La porte (NON) ou "inverseur" :

Elle possède une seule entrée et un e seule sortie.

Elle se comporte comme le circuit électrique de la figure (15-19c).

*Le nombre "1" représente un haut voltage (électrique) et un énoncé vrai (logique). Le nombre "0" représente un bas voltage (électrique) et un énoncé faux (logique)*

**Table de vérité :**

| Entrée (Input) | Sortie (Output) |
|---|---|
| 1 | 0 |
| 0 | 1 |

**Figure (15-19a)**
Symbole de l'inverseur

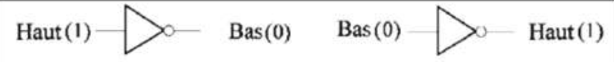


**Figure (15-19b)**
Divers cas de l'inverseur

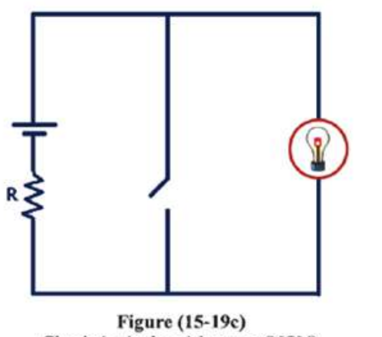


**Figure (15-19c)**
Circuit équivalent à la porte (NON).
"Si l'interrupteur est fermé l'ampoule s'éteint"

## 2. La porte (ET) ou "concordance" :

Elle possède deux ou plusieurs entrées et une seule sortie.

Elle se comporte comme le circuit électrique de la figure (15-20c) dans lequel l'ampoule s'éclaire uniquement si les deux interrupteurs, qui sont reliés en série, sont fermés.

**Table de vérité :**

| Entrée A | Entrée B | Sortie |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |

La valeur de la sortie est (1) à condition que la valeur des deux entrée s soit (1).

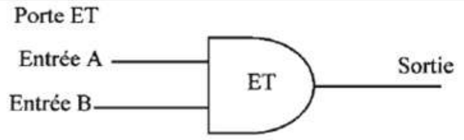



**Figure (15-20a)**
Symbole de la porte (ET)

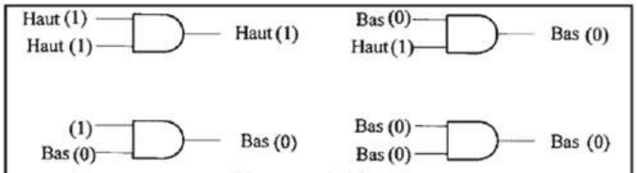



**Figure (15-20b)**
Divers cas de la porte (ET)

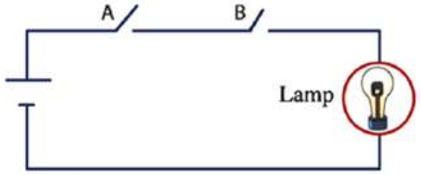



**Figure (15-20c)**
Circuit équivalent à la porte (ET).
"L'ampoule s'éclaire uniquement si les deux interrupteurs sont fermés "

## 2. La porte (OU) ou "choix" :

Elle possède deux ou plusieurs entrées et une seule sortie.
Elle se comporte comme le circuit électrique de la figure (15-21c) dans lequel l'ampoule s'éclaire si l'un des deux interrupteurs, qui sont reliés en parallèle, est fermé.

**Table de vérité :**

| Entrée A | Entrée B | Sortie |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 |

La valeur de la sortie est (1) à condition que la valeur de l'une des deux entrées soit (1).

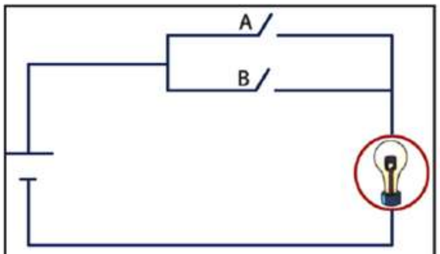


**Figure (15-21c)**
Circuit équivalent à la porte (OU).
"L'ampoule s'éclaire si l'un des deux interrupteurs est fermé"

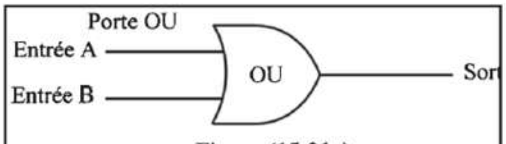


**Figure (15-21a)**
Symbole de la porte (OU)

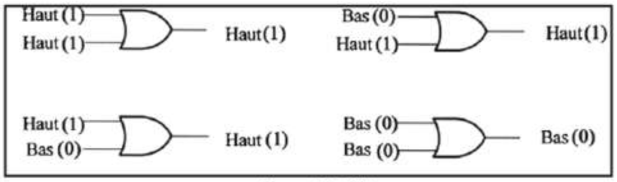


Figure (15-21b)
Divers cas de la porte (ou)

• Toutes les opérations effectuées par l'ordinateur sont basées sur l'utilisation de ces portes logiques.

• Ces portes peuvent être fabriquées par des transistors qui se comportent, dans ce cas, comme des interrupteurs et non comme des amplificateurs.

# Résumé

• Le cristal d'un métal se compose d'ions positifs et d'un nuage d'électrons libres se déplaçant d'une manière aléatoire. Il existe une force d'attraction entre ces ions et le nuage électronique. La résultante des forces agissant sur chaque électron est nulle.
Si l'électron essaye de s'échapper de la surface du métal, une force d'attraction l'attire vers l'intérieur.

• Le cristal de silicium (semi conducteur) pur se compose d'atomes liés ensembles par des liaisons covalentes. Aux basses températures on n'y trouve pas d'électrons libres. Si la température s'élève, quelques liaisons se brisent, des électrons se libèrent et des trous apparaissent. Les trous et les électrons qui sont libérés se déplacent d'une manière aléatoire.

• Le nombre de liaisons brisées augmente avec l'augmentation de température et aussi sous l'action d'un facteur externe ; comme la lumière, à condition que l'énergie des photons soit suffisante.

• Par l'addition d'impuretés dans le type-N, le nombre d'électrons libres devient plus grand que celui des trous. Le contraire se produit dans le cas des impuretés dans le type-P.

• La conductibilité d'un semi conducteur dépend de la concentration des électrons libres et des trous. C.à.d. que celui-ci possède deux porteurs de charges tandis que les métaux possèdent un seul porteur de courant (les électrons).
Cette concentration est constante dans les métaux et elle ne dépend pas de la température.

• Les semi-conducteurs utilisés pour fabriquer les dispositifs électroniques se distinguent par leur sensibilité à divers facteurs. C'est pourquoi ils sont utilisés comme détecteurs de : l'intensité lumineuse, la température, la pression, l'humidité, la pollution, la radiation nucléaire et d'autres.

• La diode ou la jonction PN se compose d'une région de type-P et une autre de type-N. La diode est directement polarisée si le type-P est relié au pôle positif d'une batterie et le type-N au pôle négatif. Dans ce cas le courant passe. Si on inverse la polarité le courant s'arrête. On utilise la diode dans le redressement du courant alternatif.

• Le transistor PNP et NPN sont utilisés dans l'amplification car le rapport du courant du collecteur au courant de la base $\beta_e$ est très grand. C'est pourquoi toute variation dans le courant de la base est amplifiée dans le circuit du collecteur.

• Le transistor est aussi utilisé comme interrupteur dans les portes logiques comme celle de la porte (NON), (ET) et (OU).

• L'électronique numérique a surmonté les problèmes du bruit de l'électronique analogue en se basant sur le principe de codage des informations par la méthode binaire "0" et "1".

# Questions et exercices

1. La concentration des électrons et des trous dans le silicium pur est $10^{10}$ $cm^{-3}$. Si l'on ajoute du phosphore dont la concentration est $10^{12}$ $cm^{-3}$, calculer la concentration des électrons et celle des trous dans ce cas.

(Réponse $n=10^{12} cm^{-3}$ ; $p=10^{8} cm^{-3}$)

2. Calculer la concentration de l'aluminium que l'on doit ajouter au silicium précédent pour qu'il revienne à l'état pur. ($N_A = 10^{12}$ $cm^{-3}$)

3. Calculer $\beta_e$ pour un transistor dont $\alpha_e = 0,99$ ; puis calculer l'intensité du courant du collecteur si celle du courant de la base est 100µA.

(Réponse : $\beta_e = 99$ ; $I_C = 99\times10^{-4}$A)

4. Si l'intensité du signal électrique à la base du transistor vaut 200µA, calculer $\alpha_e$ et $\beta_e$ qui permettent d'obtenir une intensité de courant dans le collecteur de 10mA.

(Réponse : $\beta_e=50$ ; $\alpha_e=0,98$)

5. Une diode a une résistance de 100Ω quant elle directement polarisée et une résistance infinie si elle est indirectement polarisée. Calculer l'intensité du courant traversant cette diode si on applique sur celle-ci :

1) une d.d.p. de +5V
2) une d.d.p. de -5V. (Réponse : 50 mA ; 0 A)

6. Expliquer l'importance de l'électronique numérique et citer cinq applications importantes de celle-ci.

7. Ecrire la table de vérité d'une porte (ET) suivie par une porte "inverseur".

8. Ecrire la table de vérité d'une porte (OU) suivie par une porte "inverseur".

## Qrestions et exercices de révision générale selon l'ordre des unife du programe

1. Justifier :
Dans les circuits en parallèle, on utilise des fils conducteurs épais aux extrémités de la batterie alors qu'on utilise des fils plus minces avec les extrémités des résistances.

2. Que veut-on dire par :
    1. L'intensité efficace d'un courant alternatif.
    2. Les courants de Foucault.
    3. La sensibilité d'un galvanomètre.
    4. Le rendement d'un transformateur.

3. Quelle est l'idée scientifique sur laquelle est bas ;é le fonctionnement du :
    1. Galvanomètre sensible.
    2. Transformateur électrique.
    3. Shunt ou diviseur de courant dans l'ampèr‹ əmètre.
    4. Multiplicateur de potentiel dans le voltmèt re.

4. Justifier : Le transformateur abaisseur de tensi ion est un éleveur de courant alors que le transformateur éleveur de tension est un abaisseur de courant.

5. Il existe trois points fondamentaux qu'il faut prendre en considération pour diminuer la perte d'énergie lorsqu'on fabrique un transformateur. Quels sont ces points et quel est leur rôle dans cette perte d'énergie ?

6. Justifier : Les courants de Foucault ne se produisent dans les pièces métalliques que si le champ magnétique agissant sur celles-ci est variable.

7. Comparer la dynamo à courant alternatif à la dynamo à courant redressé d'intensité à peu près constante.

8. Justifier : Pour augmenter la puissance d'un moteur électrique il faut utiliser plusieurs bobines formant entre elles des petits angles égaux.

9. Le tableau suivant indique comment varie la résistance R d'un fil conducteur de 0,1 $cm^2$ d'aire de section avec sa longueur L.

| L en mètre | 2 | 4 | 6 | 10 | 14 | 16 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| R en Ohm | 5 | 10 | 15 | 25 | 35 | 40 |

Tracer la relation graphique entre L sur l'axe X et R sur l'axe Y. A partir du graphique trouver :
    1. La résistance d'un fil de 12 m de longueur.
    2. La résistivité de la matière de ce fil.
    3. La conductivité électrique de sa matière.

10. Un fil de 30 cm de longueur et 0,3 $cm^2$ d'aire de section est relié en série avec une source de courant continu et un ampèremètre qui indique 2A. Un voltmètre relié en parallèle avec le fil indique 0,8 V. Calculer la conductivité électrique de la matière de ce fil.

11. Une bobine rectangulaire d'aire de section (A) $m^2$, formée de (N) spires est placée parallèlement à un champ magnétique dont la densité de flux est (B) Tesla. Cette bobine tourne à partir de cette position avec une vitesse angulaire constante ($\omega$) rad/s jusqu'à effectuer un demi-tour. Montrer uniquement par un graphique comment varie la f.é.m. induite avec l'angle de rotation pendant ce demi-tour (seulement).
Quelle est la valeur de la f.é.m. induite maximale ?

12. Un galvanomètre dont la bobine a une résistance de 40Ω mesure un courant d'intensité maximale 20 mA. Trouver la résistance du shunt nécessaire qui lui permet de mesurer une intensité maximale de 100 mA. Si l'on relie au galvanomètre un multiplicateur de potentiel de 210Ω, quelle est la d.d.p. maximale qu'il peut mesurer ?

13. Comparer :

1) Le transformateur éleveur et le transformateur abaisseur des points de vues : utilisation et nombre de spires du secondaire.
2) La dynamo et le moteur du point de vue utilisation.

14. Choisir, en justifiant, la réponse correcte :
On transporte l'énergie électrique à partir des stations de production d'électricité à travers des câbles sous haute tension pour :

1) Utiliser des transformateurs.
2) S'assurer que le courant électrique peut circuler sur une grande distance.
3) Diminuer la perte d'énergie électrique.
4) Diminuer la résistance des câbles.

15. Que veut-on dire par :
1) Le coefficient d'induction mutuelle entre deux bobines = 2 Henry
2) Le rendement d'un transformateur = 90%
3) Les courants de Foucault.
4) L'intensité efficace d'un courant alternatif = 2A

16. Un transformateur abaisseur dont le rendement =100% est utilisé pour faire fonctionner une lampe électrique de puissance 24 watt sous un d.d.p. de 12 V au moyen d'une source de courant de 240 V. Si la bobine secondaire est formée de 480 spires, calculer :
1) L'intensité du courant dans le primaire et celle du secondaire.
2) Le nombre de spires du primaire.

17. Lorsqu'un courant électrique traverse un fil placé perpendiculairement à un champ magnétique uniforme, ce fil subit une force. Lequel des appareils suivants est basé sur cet effet :
1) L'électro-aimant.
2) Le moteur électrique.
3) Le générateur électrique.
4) Le transformateur.

18. Calculer la f.é.m. d'une source qui produit un travail de 100 J pour déplacer une quantité d'électricité de 5 C.

19. Trois résistances de 10Ω ; 20Ω ; 30Ω sont reliées à une source électrique. L'intensité du courant qui les traverse est respectivement 0,15A ; 0,2A ; 0,05A. Calculer la résistance équivalente (totale) du circuit en indiquant par un schéma comment ces résistances sont connectées à la source.

20. Une source de courant de f.é.m. 130V et de résistance interne négligeable est reliée en série à deux résistances de 400Ω et 300Ω. Un voltmètre de résistance 200Ω est une fois relié entre les bornes de la première résistance puis une autre fois entre les bornes de l'autre. Comparer les lectures du voltmètre.

21. Un fil de 2cm de longueur, de 0,1 $m^2$ d'aire de section relié à une source de courant dont la f.é.m. est 10V est traversé par un courant de 2A d'intensité. Calculer la résistivité et la conductivité électrique de sa matière.

22. Deux fils en cuivre sont tels que le premier a 10m de longueur et 0,1 kg de masse. Le second a 40 m de longueur et 0,2 kg de masse. Comparer leurs résistances.

23. Un fil de section régulière est traversé par un courant de 0,1A d'intensité quand la d.d.p. entre ses bornes est 1,2V. Ce fil est plié en forme d'un carré fermé abcd. Calculer la résistance équivalente du fil si on relie une source de courant entre les points :
1) a et c 2) a et d

24. Une station de production d'électricité est reliée à une usine distante de 2,5km par deux câbles. Si la d.d.p. entre les bornes de la station est 240V, celle entre les bornes de l'usine est 220V et l'intensité du courant traversant celle-ci est 80A; calculer la résistance d'un mètre de ce câble ainsi que son rayon sachant que la résistivité de sa matière est $1{,}57\times10^{-8}\ \Omega.m$.

25. Calculer la densité du flux magnétique en un point situé dans l'air à 0,1 m d'un fil rectiligne, long, traversé par un courant de 10A sachant que le coefficient de perméabilité de l'air est $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ wb/A.m.

26. Deux fils rectilignes et parallèles sont traversés par des courants respectifs de 10A et 5A d'intensités. Calculer la densité du flux magnétique en point situé entre eux à 0,1 m du premier fil et à 0,2m du second et ceci dans les cas suivants :

1) Les deux courants sont de même sens.
2) Les deux courants sont de sens contraires

27. Un fil traversé par un courant est enroulé en forme d'une bobine circulaire formée d'une seule spire. On enroule le même fil en forme d'une bobine circulaire formée de 4 spires et il est traversé par le même courant. Comparer la densité du flux magnétique obtenue aux centres de ces deux bobines.

28. Une bobine en spirale (solénoïde) a 0,22 m de longueur, $25\times10^{-4}m^2$ d'aire de section et elle contient 300 spires. Quelle est l'intensité du courant qui doit la traverser pour obtenir au centre de son axe une densité de flux de $1{,}2\times10^{-3}$ wb/m$^2$ ? Quelle est la valeur du flux total traversant cette bobine ?

29. Un fil rectiligne de 10 cm de longueur traversé par un courant de 20A d'intensité est placé dans un champ magnétique dont la densité de flux est $2\times10^{-3}$ wb/m$^2$ de sorte que le fil fait un angle de 30° avec ce champ. Calculer la force agissant sur le fil.

30. Une bobine rectangulaire de 30cm de longueur, 20 cm de largeur formée de 10 spires et traversée par un courant d'intensité 10A est placée dans un champ magnétique uniforme de densité 0,1 Tesla. Calculer le moment du couple agissant sur cette bobine lorsque son plan fait un angle de 50° avec le champ.

31. Une bobine circulaire formée de 100 spires, traversée par un courant de 10A d'intensité est placée dans un champ magnétique de densité 0,2 Tesla, Si l'aire de section de cette bobine est 0,3 m$^2$ ; calculer le moment maximal du couple agissant sur la bobine en précisant la position du plan de la bobine par rapport au champ dans ce cas.

32. Lorsqu'un galvanomètre à cadre mobile est traversé par un courant de 30 mA d'intensité sa bobine fait un angle de 60° avec le champ. Calculer la sensibilité de ce galvanomètre.

33. Un galvanomètre dont la bobine a une résistance de 5Ω mesure une intensité maximale de courant de 20 mA. Que devient sa limite de mesure si on relie à sa bobine un shunt de 0,1Ω ? Calculer ensuite la résistance du multiplicateur de potentiel qu'il faut relier avec le galvanomètre pour le transformer en voltmètre mesurant une d.d.p. de 5V.

34. Un shunt de résistance 0,1 Ω diminue de 1/10 la sensibilité d'un galvanomètre. Trouver la résistance du shunt qui permet de diminuer de ¼ la sensibilité de ce galvanomètre.

35. Traiter, en détails, le problème qu'a rencontré la physique classique pour interpréter les courbes de la relation entre l'intensité des radiations émises par un corps chaud et la longueur d'onde, à des températures différentes.

36. Expliquer comment Planck a pu interpréter le phénomène des radiations émises par un corps noir.

37. Que veut-on dire par l'effet photoélectrique ? Comment la théorie quantique des radiations l'a t-elle interprétée ?

38. L'effet Compton est un exemple qui permet de démontrer la nature corpusculaire des ondes. Traiter ceci en détails.

39. Le microscope électronique est l'un des exemples concrets da la nature ondulatoire des électrons. Expliquer le principe de fonctionnement de cet appareil et montrer en quoi il se distingue du microscope optique.

40. Justifier : Le spectre de raies ne peut être émis par une matière que si celle-ci est sous la forme d'atomes séparés ou à l'état gazeux sous une faible pression.

41. Quel est le rôle du champ électrique entre le filament et la cible pour engendrer des rayons X dans le tube de Coolidge ?

42. Justifier : La longueur d'onde du spectre caractéristique des rayons X dépend de la nature de la matière de la cible et non de la d.d.p. entre celle-ci et le filament.

43. Justifier : Dans les sources de lumière laser il est nécessaire que la matière efficace arrive à l'état de l'inversion de population alors que cela n'est pas nécessaire pour les sources de lumière ordinaires.

44. Dans l'appareil laser, la cavité résonante est l'unité responsable pour effectuer deux opérations qui sont l'émission stimulée et l'amplification de la lumière. Expliquer, en détails, comment se produisent ces deux opérations.

45. Expliquer le rôle des deux éléments : l'hélium et le néon pour produire le rayon laser.

46. Le laser Hélium-Néon est un exemple de transformation de l'énergie électrique en énergies lumineuse et calorifique. Expliquer le mécanisme de cette transformation.

47. Comparer la photographie ordinaire à la photographie holographique du point de vue transport des caractéristiques de l'image à la plaque photographique.

48. Qu'est-ce qu'un semi conducteur pur ? Quelles sont les caractéristiques de sa conductibilité électrique ?

49. Traiter les différentes méthodes permettant d'améliorer le rendement (la conductibilité) d'un semi conducteur. Quelles sont les caractéristiques de la matière après l'utilisation de chacune de ces méthodes ?

50. Traiter chacun des termes suivants :

1) Le trou positif
2) L'atome impur
3) La barrière de potentiel
4) Un semi conducteur du type positif
5) Le courant dérivé
6) Un semi conducteur du type négatif
7) Le courant de diffusion

51. Traiter le concept de l'équilibre dynamique et thermique dans un cristal semi conducteur.

52. Comparer les caractéristiques de la polarisation directe et indirecte d'une jonction PN.

53. Expliquer comment la jonction PN permet de redresser un courant alternatif. Appuyer votre réponse par un schéma.

54. Expliquer comment le transistor peut fonctionner comme interrupteur.

55. Comparer le principe de fonctionnement des appareils électroniques analogues et numériques (digitaux).

56. Traiter la phrase suivante : Le système binaire est la base de la technologie électronique numérique et des opérations logiques.

57. Tracer un circuit électrique simple permettant d'obtenir une porte à trois entrées et une seule sortie. Ecrire la table de vérité correspondante à cette porte.

58. Qu'est ce-qu'un circuit intégré ? Comment a-t-il pu remplacer plusieurs composantes électroniques séparées ?

# Solutions de certaines questions de comprébensions et d'applications

1. L'effet Van der Waals explique comment la force d'attraction intermoléculaire agit sur les molécules d'un gaz. Chaque molécule perd sa liberté de mouvement lorsqu'elle se déplace d'un point à un autre à l'intérieur du récipient qui la contient. La distance intermoléculaire diminue, par suite la masse volumique du gaz augmente et ce gaz se transforme en liquide.

2. Quand la température diminue, l'énergie cinétique et la vitesse moyenne des molécules diminuent. A ce moment l'effet Van der Waals agit fortement sur les molécules du gaz qui s'attirent beaucoup plus.

3. L'augmentation de la masse volumique du gaz signifie une augmentation de sa masse par rapport à l'unité de volume occupé par le gaz dans le récipient qui le contient. Cette augmentation de masse entraîne une augmentation des forces d'attraction intermoléculaires qui ne sont plus négligeables. L'augmentation de masse est causée soit par la grande masse de la molécule elle-même ou par la diminution de la distance intermoléculaire ou par ces deux facteurs à la fois.

4. La chaleur se déplace d'un corps chaud à un autre froid par trois méthodes : La conduction, la convection et le rayonnement. Le vase Dewar a été construit de manière à diminuer ces trois sources de perte de chaleur.
La double paroi permet de diminuer la perte de chaleur par conduction. Le vide entre les deux parois permet de diminuer la perte de chaleur par convection. Les surfaces réfléchissantes des deux parois permettent de diminuer la perte de chaleur par rayonnement.

5. La grande conductivité de ces matières annule leur résistance. Ces antennes seront sensibles à n'importe quel signal envoyé par les ondes électromagnétiques même s'il est très faible. Ceci permet de le capter et de le recevoir nettement.

6. La grande conductivité de ces matières annule leur résistance ce qui facilite l'action d'un champ magnétique extérieur sur les électrons libres de ces matières. Ceux-ci conservent leurs énergies cinétiques sans perte sous forme d'énergie calorifique. Le courant engendré par le mouvement de ces électrons engendre un champ magnétique qui conduit à l'effet Meissner. C'est pourquoi cet effet ne peut pas se produire dans les matières qui ne sont pas supraconductrices.

7. La température d'un gaz dépend de l'énergie cinétique moyenne de ces molécules. Or l'énergie cinétique dépend de la masse de la molécule et de sa vitesse. La masse de la molécule d'argon étant plus grande que celle de la molécule d'hélium et la vitesse étant la même, l'énergie cinétique des molécules de l'argon sera supérieure et par suite la température de ce gaz sera supérieure à celle de l'hélium.

8. Car dans les circuits en parallèle l'intensité du courant entrant et sortant de la batterie est grande alors que ce courant est de plus faible intensité dans les branches où se trouvent les résistances.

20. $R = \frac{V}{I} = \frac{0,8}{2} = 0,4\ \Omega$

$\rho = \frac{RA}{L} = \frac{0,4 \times 0,3 \times 10^{-4}}{30 \times 10^{-2}} = 4 \times 10^{-5}\ \Omega.m$

$\sigma = \frac{1}{} = \frac{1}{4 \times 10^{-5}} = 2500\ \Omega^{-1}.m^{-1}$

22. $R_S = \frac{I_g \times R_g}{I - I_g} = \frac{20 \times 10^{-3} \times 40}{100 \times 10^{-3} - 10 \times 10^{-3}} = 10\ \Omega$

$V = I_g\,(R_g + R_m) = 20 \times 10^{-3}\,(40+210) = 5\ V$

26. $P_S = V_S \times I_S \rightarrow 24 = 12 \times I_S \rightarrow I_S = 2\ A$

$\frac{V_S}{V_P} = \frac{I_P}{I_S} \rightarrow \frac{12}{240} = \frac{I_P}{2} \rightarrow I_P = 0,1\ A$

$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P} \rightarrow \frac{12}{240} = \frac{480}{N_P} \rightarrow N_P = 9600$

28. $V_B = \frac{W}{Q} = \frac{100}{5} = 20\ V$

# Appendices

# Appendice (1)

## Symboles et unités de quelques grandeurs physiques

| | Grandeur | Symbole | Unité |
|---|---|---|---|
| 1 | Déplacement | x, y, z, d | m |
| 2 | Aire | A | $m^2$ |
| 3 | Volume | V | $m^3$ |
| 4 | Temps | t | s |
| 5 | Temps périodique (période) | T | s |
| 6 | Vitesse | v | $m.s^{-1}$ |
| 7 | Angle | $\alpha, \theta, \varphi$ | degré (°), rad |
| 8 | Fréquence angulaire (vitesse angulaire) | $\omega$ | rad $s^{-1}$ |
| 9 | Masse | m, M | kg |
| 10 | Masse volumique | $\rho$ | $kg.m^{-3}$ |
| 11 | Accélération | a | $m.s^{-2}$ |
| 12 | Accélération terrestre (accélération de la chute libre) | g | $m.s^{-2}$ |
| 13 | Quantité de mouvement | p | $kg.m.s^{-1}$ |
| 14 | Force | F | N, $kg.m.s^{-2}$ |
| 15 | Poids | $F_g$ | N |
| 16 | Moment mécanique (moment du couple) | $\tau$ | N.m |
| 17 | Travail | W | J |
| 18 | Energie | E | J |
| 19 | Energie cinétique | $E_c$ | J |
| 20 | Energie potentielle. | $E_P$ | J |
| 21 | Puissance | $P_W$ | W, $J.s^{-1}$ |
| 22 | Température | t, T | °C, °F, °K |
| 23 | Quantité de matière | n | mole |
| 24 | Pression | P | Pascal, $N.m^{-2}$ |
| 25 | Pression atmosphérique | $P_a$ | Pascal, $N.m^{-2}$ |
| 26 | Quantité de chaleur (Energie thermique) | $Q_{th}$ | J |
| 27 | Chaleur spécifique | c | $J.kg^{-1}.K^{-1}$ |
| 28 | Capacité calorifique | $q_{th}$ | $J.K^{-1}$ |
| 29 | Chaleur latente de vaporisation | $B_{th}$ | $J.kg^{-1}$ |
| 30 | Chaleur latente de fusion | $L_{th}$ | $J.kg^{-1}$ |
| 31 | Coefficient de dilatation volumique d'un gaz | $\alpha_V$ | ------ |
| 32 | Coefficient d'augmentation de pression d'un gaz | $\beta$ | ------ |

| | Grandeur | Symbole | Unité |
|---|---|---|---|
| 33 | Débit massique (taux d'écoulement massique) | $Q_m$ | kg/s |
| 34 | Débit volumique (taux d'écoulement volumique) | $Q_V$ | $m^3/s$ |
| 35 | Coefficient de viscosité | $\eta_{vs}$ | $N.s.m^{-2}$ |
| 36 | Rendement | $\eta$ | -------- |
| 37 | Charge électrique | Q, q | C |
| 38 | Charge de l'électron | e | C |
| 39 | d.d.p. électrique | V | V |
| 40 | d.d.p. d'une pile | $V_B$ | V |
| 41 | Force électromotrice | f.é.m. | V |
| 42 | Intensité du champ électrique | $\varepsilon$ | $V.m^{-1}$ |
| 43 | Densité du flux électrique | $\varphi_e$ | Gauss |
| 44 | Intensité du courant électrique | I | A |
| 45 | Résistance électrique | R | $\Omega$ |
| 46 | Résistivité | $\rho_e$ | $\Omega.m$ |
| 47 | Conductivité | $\sigma$ | $\Omega^{-1}.m^{-1}$ |
| 48 | Coefficient d'amplification du transistor | $\alpha_e$, $\beta_e$ | ------- |
| 49 | Intensité du champ magnétique | H | $A.m^{-1}$ |
| 50 | Densité du flux magnétique | B | Tesla, $wb.m^{-2}$ |
| 51 | Flux magnétique | $\varphi_m$ | Weber (wb) |
| 52 | Coefficient de self-induction | $L_m$ | Henry |
| 53 | Coefficient d'induction mutuelle | $M_m$ | Henry |
| 54 | Perméabilité magnétique | $\mu$ | $Wb.A^{-1}.m^{-1}$ |
| 55 | Moment du dipôle magnétique | $\overrightarrow{m_d}$ | $N.m.Tesla^{-1}$ |
| 56 | Vitesse de la lumière | c | $m.s^{-1}$ |
| 57 | Fréquence de l'onde | $\nu$ | Hertz (Hz) |
| 58 | Fréquence du courant électrique | f | Hz |
| 59 | Longueur d'onde | $\lambda$ | m |
| 60 | Indice de réfraction de la lumière | n | ------ |
| 61 | Pouvoir de dispersion chromatique | $\omega_\alpha$ | ------ |

# Appendice (2)

## Constantes physiques fondamentales

| | Constantes physiques | Symbole | Valeur numérique |
|---|---|---|---|
| 1 | Constante de gravitation universelle | G | $6,677\times10^{-11}$ N.m$^2$.kg$^{-2}$ |
| 2 | Constante de Boltzmann | k | $1,38\times10^{-23}$ J.K$^{-1}$ |
| 3 | Nombre d'Avogadro | $N_A$ | $6,02\times10^{23}$ molecule.mol$^{-1}$ |
| 4 | Constante générale des gaz | R | 8,31 J.mol$^{-1}$.K$^{-1}$ |
| 5 | Constante de Coulomb | K | $9\times10^{9}$ N.m$^2$.c$^{-2}$ |
| 6 | Perméabilité du vide | $\mu$ | $4\pi\times10^{-7}$ wb.m$^{1}$.A$^{-1}$ |
| 7 | Vitesse de la lumière dans le vide | c | $3\times10^{8}$ m.s$^{-1}$ |
| 8 | Charge élémentaire | e | $1,6\times10^{-19}$ C |
| 9 | Masse de l'électron au repos | $m_e$ | $9,1\times10^{-31}$ kg |
| 10 | Charge massique (spécifique) de l'électron | $\frac{e}{m}$ | $1,79\times10^{11}$ C.kg$^{-1}$ |
| 11 | Masse du proton au repos | $m_p$ | $1,673\times10^{-27}$ kg |
| 12 | Constante de Planck | h | $6,63\times10^{-34}$ J.s |
| 13 | Unité de masse atomique | u | $1,66\times10^{-27}$ kg |
| 14 | Constante de Rydberg | $R_H$ | $1,096\times10^{7}$ m$^{-1}$ |
| 15 | Masse du neutron au repos | $m_n$ | $1,675\times10^{-27}$ kg |
| 16 | Volume d'une mole de gaz parfait à T.P.N. | ------- | $22,4\times10^{-3}$ m$^3$ |
| 17 | Intensité du champ de la pesanteur à la surface terrestre | g | 9,8066 m.s$^{-2}$ |
| 18 | Rayon équatorial terrestre | $r_T$ | $6,374\times10^{6}$ m |
| 19 | Masse de la Terre | $M_T$ | $5,976\times10^{24}$ kg |
| 20 | Masse de la Lune | $M_L$ | $7,35\times10^{22}$ kg |
| 21 | Rayon moyen de la trajectoire de la lune autour de la Terre | $R_M$ | $3,844\times10^{8}$ m |
| 22 | Masse du Soleil | $M_S$ | $1,989\times10^{30}$ kg |
| 23 | Rayon moyen de la trajectoire de la terre autour du Soleil | $R_{TS}$ | $1,496\times10^{11}$ m |
| 24 | Période de rotation de la Terre autour du soleil | an | $3,156\times10^{7}$ s |
| 25 | Rayon de notre galaxie | ------ | $7,5\times10^{20}$ m |
| 26 | Masse de notre galaxie | ------ | $2,7\times10^{41}$ kg |
| 27 | Rayon du Soleil | ------ | $7\times10^{8}$ m |
| 28 | Intensité des radiations solaires sur la surface de la Terre | ------ | 0,134 J.cm$^{-2}$.s$^{-1}$ |

# Appendice (3)

# Préfixes standard

| préfixe | Valeur de la puissance |
|---|---|
| Yocto | $10^{-24}$ |
| Zepto | $10^{-21}$ |
| Atto | $10^{-18}$ |
| Femto | $10^{-15}$ |
| Pico | $10^{-12}$ |
| Nano | $10^{-9}$ |
| Micro | $10^{-6}$ |
| Milli | $10^{-3}$ |
| Centi | $10^{-2}$ |
| Déci | $10^{-1}$ |
| ------ | $10^{0}$ |
| Déca | $10^{1}$ |
| Hecto | $10^{2}$ |
| Kilo | $10^{3}$ |
| Méga | $10^{6}$ |
| Giga | $10^{9}$ |
| Téra | $10^{12}$ |
| Peta | $10^{15}$ |
| Exa | $10^{18}$ |
| Zetta | $10^{21}$ |
| Yotta | $10^{24}$ |

# Appendice (4)

## Alphabet Grec

| Appellation | minuscule | Majuscule |
|---|---|---|
| Alpha | α | Α |
| Bêta | β | Β |
| Gamma | γ | Γ |
| Delta | δ | Δ |
| Epsilon | ε | Ε |
| Dzêta | ζ | Ζ |
| Êta | η | Η |
| Thêta | θ | Θ |
| Iota | ι | Ι |
| Kappa | κ | Κ |
| Lambda | λ | Λ |
| Mu | μ | Μ |
| Nu | ν | Ν |
| Xi | ξ | Ξ |
| Omicron | ο | Ο |
| Pi | π | Π |
| Rhô | ρ | Ρ |
| Sigma | σ | Σ |
| Tau | τ | Τ |
| Upsilon | υ | Υ |
| Phi | φ | Φ |
| Khi | χ | Χ |
| Psi | ψ | Ψ |
| Oméga | ω | Ω |

# Appendice (5)

## Biographie de quelques physiciens

| | |
|---|---|
| Abou El Barakat (Ebn Malka) (1072-1152) | Pionnier en médecine. Il a découvert les lois du mouvement. |
| Abou El Hassan (Ebn Younes El Masry) (952-1009) | Pionnier en astronomie et inventeur du pendule simple. |
| Abou El Rihan Mohamed El Beirouni (973-1048) | Pionnier en géographie et en astronomie. Le premier qui a pu calculer le rayon terrestre. |
| Abou El Hassan (Ebn El Hayssam) (965-1040) | Pionnier en mathématique, astronomie, médecine et le fondateur de l'optique. |
| Abo Youssef Yacob Ebn Ishak (El Kanadi) (800-873) | Pionnier en philosophie et en physique (surtout l'optique). |
| Edison (Thomas) (1847-1931) | Inventeur du phonographe, de l'ampoule électrique et de quelques appareils électriques. |
| Archimède (212-287 av.J.C.) | Plusieurs découvertes ; comme le rapport du rayon d'un cercle à son périmètre, la loi des corps flottants et le miroir réfléchissant. |
| Avogadro (Amedeo) (1776-1856) | Physicien italien. Il énonça une théorie sur les molécules gazeuses qui porte son nom. |
| Einstein (Albert) (1879-1955) | Prix Nobel 1921 pour ses recherches en physique théorique et sa découverte de la loi de l'effet photoélectrique. |
| Ampère (André Marie) (1775-1836) | Il étudia l'électricité, le magnétisme et le télégramme. |
| Oersted (Christian) (1777-1851) | Fondateur de l'électromagnétisme en 1820. |
| Ohm (Georg) (1789-1854) | Physicien allemand, il étudia les courants de Galvani, découvrit la distribution de la f.é.m. dans les circuits électriques et énonça la loi d'Ohm. |

| | |
|---|---|
| Pascal (Blaise) (1623-1662) | Il réalisa plusieurs ouvrages et effectua des recherches scientifiques dans les domaines de la mécanique des fluides, les lois de la pression atmosphérique et celles de l'eau ainsi que l'équilibre des liquides. |
| Badee El Zaman (Ebn El Razaz El Guazri) | Pionnier dans le domaine des mesures, la mécanique et l'industrie des appareils aquatiques. |
| Bragg (William) (1862-1942) | Physicien anglais, prix Nobel 1915. Il étudia la diffraction des rayons X pour l'analyse de la composition des cristaux. |
| Bohr (Neils) (1885-1962) | Prix Nobel 1922 pour ses recherches pratiques dans la composition des atomes et les radiations qu'il émet. |
| Boyle (Robert) (1627-1691) | Il a découvert la loi de la pression des gaz. |
| Torricelli (Evangelista) (1608-1647) | Inventeur du baromètre à mercure. |
| Galilée (Galilei) (1564-1642) | Physicien et astronome italien. Il fut le premier à découvrir que la chute des corps est indépendante de leurs masses. Il inventa la première lunette astronomique. |
| Galvani (Luigi) (1737-1798) | Physicien et médecin italien. Par ses expériences il découvrit que les muscles et les nerfs produisent des charges électriques. |
| Dalton (John) (1766-1844) | Chimiste et physicien anglais. Il fut le premier à énoncer les hypothèses de la constitution de l'atome et la loi des mélanges gazeux. |
| Rutherford (Ernest) (1871-1937) | Il étudia expérimentalement les propriétés de l'atome et des radiations. Prix Nobel 1908 pour ses recherches sur la radioactivité des éléments. |
| Ruhmkorff (Heinrich) (1803-1877) | Savant franco-allemand. Inventeur de la poulie portant son nom et de la bobine d'induction. |
| Röntgen (Wilhem) (1845-1923) | Physicien allemand. Il a découvert les rayons X. |

| | |
|---|---|
| Schrödinger (Erwin) (1887-1961) | Physicien autrichien. Prix Nobel 1933 pour ses recherches sur la mécanique ondulatoire. |
| Abdel Rahman Abou Gaafar (Al Khazen) (XII$^{ème}$ siècle) | Pionnier de l'hydrostatique, de la mesure de la pression et de la chaleur. |
| Faraday (Michael) (1791-1867) | Il a établi les lois de l'électromagnétisme et le concept des champs. |
| Van der Walls (Johannes) (1837-1923) | Prix Nobel 1910 pour ses études sur les états gazeux et liquides. |
| Fraunhofer (Joseph Von) (1787-1826) | Il expliqua la présence des raies noires dans le spectre solaire ce qui a permis la découverte des différents éléments se trouvant dans le soleil. |
| Volta (Alessandro) (1745-1827) | Physicien italien. Il fut le premier à inventer la pile électrique. Il développa la théorie du courant électrique. L'unité de mesure du potentiel porte son nom. |
| Fermi (Enrico) (1901-1954) | Physicien italien. Prix Nobel 1938. Il étudia l'énergie nucléaire. Ses recherches ont mené à la production d'éléments radioactifs par le bombardement avec des neutrons. Il est le père de la bombe atomique. |
| Kamerlingh (Onnes) (1853-1926) | Prix Nobel 1913 pour ses recherches sur les propriétés de la matière à basse température qui permit de produire l'hélium liquide et à la découverte du phénomène de la supraconductivité des métaux et de quelques composés. |
| Kepler (Johannes) (1571-1630) | Astronome allemand. Il énonça les lois du mouvement des planètes, ce qui permit à Newton de découvrir la loi de la gravitation universelle. |
| Copernic (Nicolas) (1473-1543) | Astronome polonais. Il prouva la rotation de la terre autour de son axe et autour du soleil. |
| Kirchhoff (Gustav) (1824-1887) | Physicien allemand. Il a découvert les lois des circuits électriques. |
| Lenz (Heinrich) (1804-1865) | Il a découvert le sens de la f.é.m. induite et du courant induit. |

| | |
|---|---|
| Planck (Max) (1858-1947) | Prix Nobel 1918 pour ses recherches dans le domaine de la physique quantique. |
| Maxwell (James) | Il fut le premier à énoncer les lois de l'électromagnétisme et des équations qui portent son nom. |
| Newton (Isaac) (1642-1727) | Il a découvert la composition de la lumière blanche, les lois de la gravitation et celles du mouvement. |
| Hertz (Heinrich) (1857-1894) | Il a découvert les ondes électromagnétiques et formula des lois à partir des équations de Maxwell. |
| Huygens (Christian) (1629-1695) | Il fut le premier à découvrir les propriétés ondulatoires de la lumière. |
| Young (Thomas) (1773-1829) | Physicien et médecin qui étudia expérimentalement l'interférence lumineuse, les couleurs et la théorie ondulatoire de la lumière. |

# Appendice (6)

## Quelques sites Internet concernant la physique

http://imagine.gsf.nasa.gov

http://csep10.phys.utk.edu

http://www.howstuffworks.com

http://www.dke-encyc.com

http://www.colorado.edu/physics/2000/index.pl

http://scienceworld.wolfram.com/physics

http://www.physlink.com

http://www.intuitor.com/moviephysics

http://www.newport.com/spectralanding

http://www.mathpages.com/home/iphysics/htm

http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html

## المواصفات الفنيــة:

| | |
|---|---|
| مقــاس الكتــــاب: | $\frac{1}{8}$ (٥٧ × ٨٢) سم |
| طبـــع المتــــن: | ٤ لون |
| طبـــع الغـــلاف: | ٤ لون |
| ورق المتـــــن: | ٨٠ جم أبيض |
| ورق الغـــــلاف: | ٢٠٠ جم كوشيه |
| عدد الصفحات بالغلاف: | ٢١٢ صفحة |

الأشـــــــراف برنتنج هاوس